

Untersuchungen des Geschiebetransports auf statischen Deckschichten

Von der
Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines
Doktoringenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von
Dipl.-Ing. Klaus Koll
geboren am 09.05.1973
aus Cuxhaven

Eingereicht am 19. Oktober 2012
Disputation am 07. Dezember 2012

Berichterstatter Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Dittrich
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stamm

2013

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand auf der Grundlage von Untersuchungen im Rahmen des Projektes „Interreg IVa - Redynamisierung des Restrheins“ während meiner Tätigkeit am Leichtweiß-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Dittrich danke ich für die Ermöglichung dieser Arbeit und die Unterstützung meines Promotionsvorhabens. Nicht zuletzt möchte ich mich bei ihm für die Übernahme der Funktion als Erstgutachter bedanken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stamm danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens und sein Engagement bei der Begutachtung der vorliegenden Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Norbert Dichtl, der mich bereits während meines Studiums sehr förderte, danke ich herzlich für die Übernahme des Vorsitzes des Prüfungsgremiums und dafür, dass er stets ein offenes Ohr für mich hatte.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Mertens bedanke ich mich für die Übernahme der Funktion des Prüfers und die Anregungen in der Endphase der Fertigstellung.

Mein besonderer Dank gilt Frau Dr.-Ing. Katinka Koll, die mir bei der Durchführung meiner Forschungsarbeit stets mit fachlichem und persönlichem Rat zur Seite stand. Die wissenschaftliche Zusammenarbeit mit ihr und ihre stete Diskussionsbereitschaft waren mir eine große Unterstützung während der Anfertigung der Dissertation.

Weiterhin gilt mein Dank allen meinen Kollegen, die mich durch ihre Diskussionsbereitschaft in meinem Promotionsvorhaben unterstützt haben. Insbesondere danke ich den Werkstattmitarbeitern Herrn Ecklebe, Herrn Lehmann und Herrn Neumann, ohne deren Einsatz die Versuchsdurchführung nicht möglich gewesen wäre. Darüber hinaus danke ich den studentischen Hilfskräften für ihr Engagement sowie ihre verlässliche Unterstützung bei der Durchführung der Versuche. Dies gilt insbesondere Frau Jacqueline Kellner, Herrn Ralph Eikenberg und Herrn Henning Kewitz.

Bei meiner Familie sowie bei meinen Freunden möchte ich mich für ihre Geduld, das Verständnis und die Unterstützung herzlich bedanken.

Ein besonders herzliches Dankeschön richte ich an dieser Stelle an meine Frau Sylvia. Nicht zuletzt ihrer Geduld und ihrer Bereitschaft mich zu unterstützen und zu entlasten verdanke ich den Erfolg meiner Promotion.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Ausbreitung von externem Geschiebe auf statischen Deckschichten. Der Geschiebetrieb in Gewässerabschnitten mit statischen Deckschichten ist üblicherweise vernachlässigbar klein, solange die kritische Sohlenschubspannung der Deckschicht nicht überschritten wird. Dennoch kann Geschiebetransport auftreten, wenn oberstrom, z.B. zur gezielten Förderung von Sedimenttransport, Sediment mit einer geringeren kritischen Schubspannung deponiert wird. Das Ausbreitungsverhalten einer solchen in der Regel begrenzten Menge an externem Geschiebe auf statischen Deckschichten fand in bisherigen Untersuchungen nahezu keine Beachtung, so dass keine Berechnungsansätze existieren, mit denen dieser hochgradig instationäre Prozess beschrieben werden kann. Für die fundierte Prognose der morphologischen Entwicklung nach der Zugabe von Geschiebe und für die Abschätzung der dadurch veränderten Hochwasserrisiken ist jedoch die Vorausberechnung der Geschiebeausbreitung unabdingbar.

Mit dem Ziel der Formulierung einer empirischen Gleichung zur Beschreibung der strömungsinduzierten Ausbreitung einer Menge externen Geschiebes auf statischen Deckschichten wurden deshalb am Leichtweiß-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Den Versuchen ging eine Literaturstudie über den Bewegungsbeginn von Sediment und die Geschiebeausbreitung voran. Der aufbereitete Stand des Wissens stellt die Grundlage für die durchgeführten Untersuchungen dar, verdeutlicht aber gleichzeitig das Wissensdefizit in Hinblick auf die Geschiebeausbreitung auf statischen Deckschichten.

Die Versuche wurden mit drei unterschiedlichen statischen Deckschichten in zwei Versuchsrinnen mit einer Länge von 20 m und 6 m durchgeführt. Das Sohlenmaterial bestand aus einem Sand-Kies-Gemisch mit einem Kleinstkorn von 0,63 mm und einem Größtkorn von 55 mm. Als externes Geschiebe wurde farblich gekennzeichnete Kies (Tracer) mit Korngrößen von 1-3 mm bis 11-16 mm verwendet, der in einzelnen Fraktionen als Tracerbarre auf der Sohle aufgebracht wurde. Während der Versuche wurde die zeitliche Entwicklung der Verteilung des externen Geschiebes auf der Deckschicht ermittelt. Als maßgebliche Einflussfaktoren auf die Transportprozesse wurden hierfür die Zugabemenge und Korngröße des Zugabematerials, der Strömungsangriff, die Oberflächenstruktur der Deckschicht und die Beobachtungszeit identifiziert.

Mit zunehmendem Strömungsangriff und mit abnehmender Korngröße der Tracer nahm die Transportgeschwindigkeit zu. Der Einfluss der Oberflächenstruktur der Sohle auf das Trans-

portverhalten der Tracer wurde anhand von Versuchen mit unterschiedlichen Deckschichten untersucht. Die Transportweiten nahmen mit gröber werdender Deckschicht ab. Weiterhin wurde durch die Variation der Zugabemenge der Einfluss der Geschiebemenge auf das Transportverhalten untersucht. Die Transportweite und -geschwindigkeit nahmen mit zunehmender Geschiebemenge zu. Die Transportgeschwindigkeit der Tracer nahm in allen Versuchen mit der Versuchszeit ab.

Auf Grundlage der Versuchsergebnisse wurde eine empirische Beziehung zur Beschreibung des Ausbreitungsvorgangs von externem Geschiebe auf statischen Deckschichten formuliert. Diese besteht zum einen aus einer Formel zur zeitabhängigen Berechnung der Transportgeschwindigkeit und zum anderen aus einer Funktion zur Bestimmung des Grads der Zunahme der Geschiebeausbreitung. Der Vergleich der Formel mit unabhängigen Versuchsdaten und mit Literaturdaten zeigt eine gute Übereinstimmung.

Abstract

The present work deals with the transport of bed load over static armour layers. Bed load transport is usually negligibly small in armoured river sections as long as the critical shear stress of the armour layer is not exceeded. However, bed load transport can occur if, e.g., sediment with a lower critical shear stress is deposited upstream in order to support transport conditions. The propagation characteristics of such usually limited amounts of bed load material over static armour layers found only little attention in previous studies. Formulas to calculate these highly unsteady transport processes are missing. However, the prediction of sediment transport is indispensable for a substantiated forecast of morphological evolution and estimation of the resulting changes of the risk during flood events.

With the aim of formulating an empirical equation to describe the flow induced distribution of external bed load material over static armour layers experimental investigations were carried out at the Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig, Germany. The experiments were preceded by a literature study on incipient motion of sediment and the transport of limited amounts of bed load material. The refined level of knowledge is the basis for the experiments carried out, but at the same time demonstrates the lack of knowledge regarding the flow induced distribution of bed load material over static armour layers.

The experiments were carried out with three different static armour layers in two laboratory flumes with a length of 20 m and 6 m, respectively. The bed material consisted of sand and gravel with a minimum grain-size of 0.63 mm and maximum grain-sizes of 31.5 mm and 55 mm, respectively. Coloured gravel (tracer) with particle sizes between 1-3 mm and 11-16 mm was used as external bed load material. It was deposited as a tracer bar on top of the bed surface. During the experiments the time dependent evolution of the distribution of the tracer was determined. The amount and grain size of added sediment, flow force, structure of the bed surface and observation time were identified as being key factors influencing bed load transport.

The transport velocity increased with increasing flow force and with decreasing grain-size of the tracer. The influence of the structure of the bed surface on the transport behaviour was studied by experiments with different static armour layers. The transport distances decreased with the coarsening of the armour layer. Furthermore, the influence of the tracer amount on transport processes was investigated by varying the amount of deposited tracer. Transport distance and velocity increased with increasing amount of external bed load material. In each

experiment the transport velocity of the tracer decreased distinctly with the experimental run time.

Based on the experimental results, empirical relationships were formulated to describe the transport process of external bed load material over static armour layers. These consist, firstly, of a formula to calculate the time-dependent transport velocity and, secondly, of a function to determine the degree of the increasing longitudinal distribution of the tracer. The formula for the transport velocity was applied to independent experimental data and to data from literature. The calculated results were in very good agreement with the measured data.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Bewegungsbeginn und Sohlenstabilität.....	4
2.1	Bewegungsbeginn.....	4
2.1.1	Bewegungsbeginn von locker gelagerten Materialien	5
2.1.2	Bewegungsbeginn von Korngemischen	7
2.1.3	Einfluss der Liftkraft	12
2.1.4	Einfluss der relativen Überdeckung	12
2.2	Deckschichten.....	13
2.2.1	Statische Deckschicht	15
2.2.2	Beschreibung der Rauheit von statischen Deckschichten.....	20
3	Transport von externem Geschiebe	22
3.1	Geschiebetransportformeln für den Gleichgewichtstransport	22
3.1.1	Deterministische Ansätze zur Berechnung des Geschiebetransports.....	22
3.1.2	Stochastisches Transportmodell nach Einstein	24
3.2	Ausbreitung einer limitierten externen Geschiebemenge.....	26
3.2.1	Advektion und Dispersion	27
3.2.2	Untersuchungen zur Ausbreitung von Geschiebe	28
3.2.2.1	Laborversuche zur Ausbreitung von externem Geschiebe mit bewegter Sohle	28
3.2.2.2	Naturversuche zur Ausbreitung von externem Geschiebe bei bewegter Sohle	32
3.2.2.3	Laborversuche zur Ausbreitung von externem Geschiebe mit statischer Deckschicht.....	37
3.2.2.4	Zusammenfassung der Untersuchungen zur Geschiebeausbreitung	38
4	Ableitung offener Fragestellungen	40
5	Dimensionsanalyse	42
6	Versuche	48
6.1	Versuchsaufbau	48
6.1.1	Rinne 1 - Hydraulische Kipprinne	48
6.1.2	Rinne 2 - Kleine Rinne.....	49
6.2	Messtechnik	50
6.3	Sedimentologische Eigenschaften	52
6.3.1	Sohlensediment	52
6.3.1.1	Ausgangsmischung A_{X1} und Deckschicht Z_{X1}	53
6.3.1.2	Ausgangsmischung A_{X2} und Deckschicht D_{X2}	55
6.3.1.2	Ausgangsmischung A_{X3} und Deckschicht Z_{X3}	57

6.3.2	Tracer für die Geschiebezugabe	58
6.4	Versuchsdurchführung	59
6.4.1	Versuchsablauf	59
6.4.2	Messprogramm und Auswertemethodik	60
6.4.3	Versuchsprogramm	62
6.4.4	Reproduzierbarkeit der Ergebnisse	64
6.5	V Versuchsergebnisse	65
6.5.1	Transport über Z_{X1} ($d_m = 21,6$ mm, $\tau_{0c} = 10,7$ N/m ²)	65
6.5.1.1	Tracerversuche über Z_{X1} , $\tau_0 = 9,3$ N/m ²	65
6.5.1.2	Tracerversuche über Z_{X1} , $\tau_0 = 10,73$ N/m ²	71
6.5.2	Transport über D_{X2} ($d_m = 21,4$ mm, $\tau_{0c} = 13,6$ N/m ²)	76
6.5.3	Transport über Z_{X3} ($d_m = 13,4$ mm, $\tau_{0c} = 6,4$ N/m ²)	80
6.5.4	Ergebnisse zum Einfluss des Transports auf die Sohlenstabilität	83
6.6	Diskussion der Versuchsergebnisse	86
7	Datenanalyse und Ableitung einer empirischen Beziehung	90
7.1	Funktionale Zusammenhänge der Π -Parameter mit der dimensionslosen Transportgeschwindigkeit	90
7.1.1	Einfluss der Tracermenge	90
7.1.2	Einfluss des Strömungsangriffs und der Korngröße der Tracer	91
7.1.3	Einfluss der Versuchszeit	92
7.1.4	Einfluss der Deckschicht	94
7.1.5	Formulierung und Überprüfung der empirischen Beziehung für die dimensionslose Transportgeschwindigkeit	95
7.2	Abschätzung eines funktionalen Zusammenhangs für die Dispersion	98
7.3	Diskussion der empirischen Gleichung	100
8	Zusammenfassung und Ausblick	103
9	Literatur	107
Anhang	118
Anhang A1:	Tracerversuche mit Z_{X1} , $\tau_0 = 9,3$ N/m ²	118
Anhang A2:	Tracerversuche mit Z_{X1} , $\tau_0 = 10,7$ N/m ²	120
Anhang A3:	Tracerversuche mit D_{X2} , $\tau_0 = 13,5$ N/m ²	122
Anhang A4:	Tracerversuche mit Z_{X3} , $\tau_0 = 6,4$ N/m ²	124

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Kriterien zur Abschätzung der Abpflasterungsfähigkeit von Kiesmischungen (nach Dittrich, 1998)	16
Tab. 2.2: Zuordnung der Berechnungsansätze zur Berechnung der Sohlenstabilität (aus Koll, 2002)	19
Tab. 2.3: Empirische Ansätze zur Abschätzung der äquivalenten Sandrauheit	21
Tab. 3.1: Parameter der Versuche von Promny (2008a, b)	31
Tab. 3.2: Mittlere Transportgeschwindigkeiten zu Versuchsbeginn und zu Versuchsende (Promny, 2008b)	32
Tab. 3.3: Geschwindigkeiten der Tracerfront, Naturversuch Elbe 1996 (aus Faulhaber & Riehl, 2001)	35
Tab. 3.4: Geschwindigkeiten der Tracerfront, Naturversuch Elbe 1997 (aus Faulhaber & Riehl, 2001)	35
Tab. 3.5: Charakteristika der Zugabestellen am Allt Dubhaig (Ferguson & Wathen, 1998)	36
Tab. 3.6: Koeffizienten für die Formel nach Ferguson et al. (2002) für unterschiedliche Beobachtungszeiträume	37
Tab. 3.7: Aus Sklar et al. (2009) ermittelte Tracergeschwindigkeiten für unterschiedliche Messzeitpunkte, Korngrößen und Zugabemengen	38
Tab. 5.1: Dimensionsbehaftete Ausgangsparameter für die Dimensionsanalyse und ihr Wertebereich in den Experimenten	43
Tab. 6.1: Sedimentologische Parameter der Ausgangsmischung A_{X1} und der Deckschicht Z_{X1}	54
Tab. 6.2: Sedimentologische Parameter der Ausgangsmischung A_{X2} und der Deckschicht D_{X2}	56
Tab. 6.3: Sedimentologische Parameter der Ausgangsmischung A_{X3} und der Deckschicht Z_{X3}	58
Tab. 6.4: Kritische Schubspannungen und Farbgebung der verwendeten Tracerfraktionen	58
Tab. 6.5: Definition der aus den Tracerverteilungen bestimmten Parameter	61
Tab. 6.6: Parameter der Tracerversuche	63
Tab. 6.7: Verhältnis der Transportweiten der Tracerfront L_F und des Schwerpunkts L_S für die verschiedenen Tracerfraktionen über Z_{X1} bei $\tau_0 = 9,3 \text{ N/m}^2$	68
Tab. 6.8: Verhältnis der Transportweiten der Tracerfront L_F und des Schwerpunkts L_S für die verschiedenen Tracerfraktionen mit Z_{X1} und $\tau_0 = 10,7 \text{ N/m}^2$	73
Tab. 6.9: Verhältnis der Transportweiten der Tracerfront L_F und des Schwerpunkts L_S für die verschiedenen Tracerfraktionen mit D_{X2} und $\tau_0 = 13,5 \text{ N/m}^2$	77

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Angreifende Kräfte an ein Einzelkorn (aus Dittrich et al., 1992, modifiziert).....	4
Abb. 2.2: Shields-Diagramm (aus Shields, 1936, korrigiert)	6
Abb. 2.3: Parameter einer Sieblinie	8
Abb. 2.4: Relatives Herausragen eines Korns d_i aus einem Korngemisch.....	8
Abb. 2.5: Grenzen der Entwicklung von statischen und mobilen Deckschichten (Jain, 1990).....	14
Abb. 2.6: Deckschichtbildung in der hydraulischen Kipprinne	16
Abb. 2.7: Sieblinien der Ausgangsmischung A_{X1} , der Deckschicht im stabilen Zwischenzustand Z_{X1} sowie der Deckschicht mit maximaler Stabilität D_{X1}	18
Abb. 3.1: Advektion und Dispersion	28
Abb. 3.2: Zeitliche Entwicklung der Tracerverteilung im Feldversuch am Rhein bei Iffezheim (aus Gölz und Trompeter, 2001).....	33
Abb. 3.3: Fortschreiten von Tracerfront und -schwerpunkt im Feldversuch am Rhein bei Iffezheim (aus Gölz und Trompeter, 2001).....	34
Abb. 6.1: Hydraulische Kipprinne.....	48
Abb. 6.2: „Kleine Rinne“.....	49
Abb. 6.3: Verteilung der Tracer, $d_T = 3-5$ mm auf der Deckschicht nach $t = 30$ min, a) orthogonale Sohlenfotografie, b) Tracerverteilung aus der Bildanalyse.....	51
Abb. 6.4: Vergleich der ermittelten Längsverteilung der Tracer auf der Deckschicht aus Wägung und Bildanalyse, $d_T = 5-8$ mm, $t = 930$ min.....	51
Abb. 6.5: Sieblinien und Sohlenfotografien der Unterschicht und der Deckschicht des Rheins (aus Dittrich 2010)	53
Abb. 6.6: Sieblinien und Sohlenfotografien der Ausgangsmischung A_{X1} und der Deckschicht Z_{X1}	54
Abb. 6.7: Sieblinien und Sohlenfotografien der Ausgangsmischung A_{X2} und der Deckschicht D_{X2}	55
Abb. 6.8: Sohlenfotografien der Deckschichten Z_{X1} und D_{X2}	56
Abb. 6.9: Sieblinien und Sohlenfotografien der Ausgangsmischung A_{X3} und der Deckschicht Z_{X3}	57
Abb. 6.10: Tracerbarre auf der statischen Deckschicht Z_{X1} in der hydraulischen Kipprinne.....	59
Abb. 6.11: Längsverteilung des Tracers auf der Deckschicht mit $d_T = 3-5$ mm, Z_{X1} und $Q_{exp} = 80$ l/s, $X_{S,30}$ = Position des Schwerpunktes und $X_{F,30}$ = Position der Front nach jeweils 30 min Versuchsdauer	60

Abb. 6.12:	Wiederholung der Tracerversuche mit Z_{X1} und $d_T = 3-5$ mm (H02 und H05) sowie $d_T = 5-8$ mm und $\tau_0 = 9,3$ N/m ² (H03 und H06)	64
Abb. 6.13:	Transportweite von Tracerfront und -schwerpunkt über Z_{X1} bei $\tau_0 = 9,3$ N/m ²	66
Abb. 6.14:	Verhältnis der Transportweiten der Tracerfront L_F und des Schwerpunkts L_S als Funktion der mittleren Korngröße der Tracer $d_{T,50}$ über Z_{X1} bei $\tau_0 = 9,3$ N/m ²	67
Abb. 6.15:	Front- und Schwerpunktgeschwindigkeit der Tracer über Z_{X1} bei $\tau_0 = 9,3$ N/m ²	68
Abb. 6.16:	Schwerpunktgeschwindigkeit $u_{T,S}$ in Abhängigkeit von der Flächenkonzentration der Tracer über Z_{X1} bei $\tau_0 = 9,3$ N/m ²	70
Abb. 6.17:	Über die Laufzeit gemittelte Transportgeschwindigkeiten \bar{u}_T für Tracerfront und -schwerpunkt über Z_{X1} bei $\tau_0 = 9,3$ N/m ²	71
Abb. 6.18:	Transportweite von Tracerfront und -schwerpunkt über Z_{X1} bei $\tau_0 = 10,7$ N/m ²	72
Abb. 6.19:	Verhältnis der Transportweiten der Tracerfront L_F und des Schwerpunkts L_S als Funktion der mittleren Korngröße der Tracer $d_{T,50}$ über Z_{X1} bei $\tau_0 = 10,7$ N/m ²	73
Abb. 6.20:	Front- und Schwerpunktgeschwindigkeit der Tracer über Z_{X1} bei $\tau_0 = 10,7$ N/m ²	74
Abb. 6.21:	Transportgeschwindigkeiten mit $d_T = 5-8$ mm über Z_{X1} bei $\tau_0 = 9,3$ N/m ² und $\tau_0 = 10,7$ N/m ²	75
Abb. 6.22:	Schwerpunktgeschwindigkeit $u_{T,S}$ in Abhängigkeit von der Flächenkonzentration der Tracer über Z_{X1} bei $\tau_0 = 10,7$ N/m ²	76
Abb. 6.23:	Transportweite von Tracerfront und -schwerpunkt über D_{X2} bei $\tau_0 = 13,5$ N/m ²	77
Abb. 6.24:	Verhältnis der Transportweiten der Tracerfront L_F und des Schwerpunkts L_S als Funktion der mittleren Korngröße der Tracer $d_{T,50}$ über D_{X2} bei $\tau_0 = 13,5$ N/m ²	78
Abb. 6.25:	Front- und Schwerpunktgeschwindigkeit der Tracer über D_{X2} bei $\tau_0 = 13,5$ N/m ²	79
Abb. 6.26:	Transportweiten der Kiesmischung 3-11 mm und der drei Fraktionen 3-5 mm, 5-8 mm und 8-11 mm über D_{X2} bei $\tau_0 = 10,7$ N/m ²	80
Abb. 6.27:	Transportweiten in Abhängigkeit von der Zugabemenge über Z_{X3} bei $\tau_0 = 6,4$ N/m ² (aus Koll & Koll, 2012)	81

Abb. 6.28:	Verhältnis der Transportweiten der Tracerfront L_F und des Schwerpunkts L_S als Funktion der Zugabemenge, mit $d_T = 3-5$ mm über Z_{X3} bei $\tau_0 = 6,4$ N/m ²	82
Abb. 6.29:	Mittlere Transportweite L_S als Funktion der Zugabemenge der Tracer M_T über Z_{X3} bei $\tau_0 = 6,4$ N/m ²	83
Abb. 6.30:	Erodiertes Deckschichtmaterial während der Tracerversuche über Z_{X1} bei $\tau_0 = 9,3$ N/m ²	84
Abb. 6.31:	Relative Erosion von Deckschichtmaterial während der Tracerversuche über Z_{X1} bei $\tau_0 = 10,7$ N/m ²	85
Abb. 6.32:	Vergleich der mittleren dimensionslosen Transportgeschwindigkeit aus den Versuchen u_G^* ($d_T = 3-5, 5-8$ mm, Z_{X1} , $\tau_0 = 9,3$ N/m ²) mit den Gleichungen von Ferguson et al. (2002) und Wong et al. (2007)	89
Abb. 7.1:	Dimensionslose Transportgeschwindigkeit als Funktion der dimensionslosen Tracermenge mit $d_T = 3-5$ mm, Z_{X3} und $\tau_0 = 6,4$ N/m ²	91
Abb. 7.2:	Dimensionslose Transportgeschwindigkeit in den Versuchen H01-H10 als Funktion von τ_T^*	92
Abb. 7.3:	$u_G^*/(m_T^* \cdot \tau_T^*)$ als Funktion von l/t^* mit $d_T = 1-3, 3-5, 5-8, 8-11$ und $11-16$ mm, Z_{X1} sowie $\tau_0 = 9,3$ und $10,7$ N/m ²	93
Abb. 7.4:	u_G^* als Funktion von $(m_T^* \cdot \tau_T^*)/t^*$ für die Versuche H01-H10 und K01-K06	95
Abb. 7.5:	Vergleich der mit Gl. (7.7) berechneten dimensionslosen Transportgeschwindigkeit mit den Versuchsergebnissen mit der Deckschicht D_{X2} und mit Literaturdaten	97
Abb. 7.6	Das Verhältnis der Transportweiten von Tracerfront und -schwerpunkt L_F/L_S als Funktion des Kehrwertes der dimensionslosen Schubspannung $1/\tau_T^*$	99

Symbolverzeichnis

a	$[-]^1$	empirischer Vorfaktor
A	$[m^2]$	durchströmte Fläche des Fließquerschnitts
A^*	$[-]$	Konstante in der Transportformel von Einstein (1950)
A_1, A_2	$[-]$	Koeffizienten zur Berücksichtigung der Kornform (Einstein, 1950)
A_3	$[-]$	Koeffizient für die Zeit für die Mobilisierung eines Korns (Einstein, 1950)
A_F		Sieblinie der Fullerkurve
A_L	$[m]$	Einzelschrittweite nach Einstein (1950)
a_S	$[-]$	Parameter zur Berücksichtigung der Kornlagerung (Schöberl, 1979)
A_X		Sieblinie der Ausgangsmischung (Unterschichtmaterial)
b	$[-]$	empirischer Exponent
B^*	$[-]$	Konstante in der Transportformel von Einstein (1950)
b_T	$[m]$	Breite der Tracerbarre
C	$[-]$	Feststoffkonzentration
c	$[-]$	empirischer Exponent
C_A	$[-]$	Flächenkonzentration des Tracers
d	$[m]$	Korndurchmesser
D	$[-]$	Dispersionskoeffizient
d_{16}	$[m]$	Korndurchmesser bei 16 % Siebdurchgang
d_{50}	$[m]$	Korndurchmesser bei 50 % Siebdurchgang
d_{50D}	$[m]$	d_{50} der Deckschicht maximaler Bettstabilität
$d_{50,S}$	$[m]$	d_{50} des Sohlenmaterials
d_{65}	$[m]$	Siebdurchgang bei 65 % Siebdurchgang
d_{84}	$[m]$	Korndurchmesser bei 84 % Siebdurchgang
d_{90}	$[m]$	Korndurchmesser bei 90 % Siebdurchgang

¹ Korrekterweise müsste für die Einheit dimensionsloser Parameter die Schreibweise „[1]“ verwendet werden. Abweichend hierzu wird in dieser Arbeit die ebenfalls weit verbreitete Schreibweise „[-]“ verwendet, um eine Verwechslung mit der Volumeneinheit „[l]“ für Liter zu vermeiden.

d_{avg}	[m]	aus Sohlen- und Geschiebematerial gemittelter Korndurchmesser (Egiazaroff, 1965)
d_{ch}	[m]	charakteristischer Korndurchmesser
D_F		Sieblinie der zur Fullerkurve gehörenden Deckschicht maximaler Stabilität
d_i	[m]	Korndurchmesser der Fraktion i
d_{ia}	[m]	untere Korngrenze der Fraktion i
d_{ib}	[m]	obere Korngrenze der Fraktion i
d_j	[m]	Korndurchmesser der Fraktion j
d_m	[m]	mittlerer Korndurchmesser nach Meyer-Peter & Müller (1949)
$d_{m,S}$	[m]	d_m der Sohle
d_{mA}	[m]	d_m der Ausgangsmischung
d_{max}	[m]	Größtkorn
d_{mD}	[m]	d_m der Deckschicht
d_{mZ}	[m]	d_m der Deckschicht im stabilen Zwischenzustand
d_σ	[m]	Produkt von d_m und σ_G (Patel et al., 2009)
d_S	[m]	Korndurchmesser der Sohle
d_T	[m]	Korngröße des Tracers
$d_{T,50}$	[m]	mittlerer Korndurchmesser des Tracers
D_X		Sieblinie der Deckschicht im Zustand maximaler Bettstabilität
F_G	[N]	Gewichtskraft
F'_G	[N]	Gewichtskraft des Korns unter Auftrieb
F_L	[N]	Liftkraft
Fr	[-]	Froudezahl
Fr_{*c}	[-]	Parameter zur Bestimmung des Bewegungsbeginns (Schöberl, 1979; Chin, 1985)
Fr_G	[-]	Korn-Froude-Zahl
F_τ	[N]	Schubkraft
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung

g_o	[kg/(m·s)]	auf das Trockengewicht bezogene Geschiebetransportrate bei Klarwasserabfluss
g_B	[kg/(m·s)]	auf das Trockengewicht bezogene Geschiebetransportrate
h	[m]	Fließtiefe
H	[m]	Gesamtenergiehöhe des Fluids
h_c	[m]	kritische Fließtiefe
h_T	[m]	höhe der Tracerbarre
I	[-]	Gefälle
i	[-]	Zählvariable
i_B	[-]	Anteil der transportierten Fraktion am Geschiebe (Einstein, 1950)
i_b	[-]	Anteil der transportierten Fraktion am Sohlenmaterial (Einstein, 1950)
I_E	[-]	Energieliniengefälle
I_S	[-]	Sohlengefälle
j	[-]	Zählvariable
K	[-]	empirische konstante der Transportformel von Meyer-Peter & Müller (1949)
k_r	[m ^{1/3} /s]	auf das Korn bezogener Strickler-Beiwert
k_s	[m]	äquivalente Sandrauheit
k_{St}	[m ^{1/3} /s]	Strickler-Beiwert
l	[m]	Länge
L_F	[m]	Transportweite der Front der Geschiebeverteilung
L_S	[m]	mittlere Transportweite des Geschiebes bzw. Transportweite des Schwerpunkts der Geschiebeverteilung
l_T	[m]	Länge der Tracerbarre
M_T	[kg]	Masse des Tracers
m_T	[kg/m]	Masse des Tracers je Breitereinheit
m_T^*	[-]	dimensionslose Tracermenge
n	[-]	Zählvariable
n_{dep}	[-]	Anzahl der deponierten Körner

n_{ero}	[-]	Anzahl der erodierten Körner
P	[-]	Erosionswahrscheinlichkeit eines Kornes pro Sekunde (Einstein, 1950)
P_{ei}	[-]	Wahrscheinlichkeit eines Partikels der Fraktion j höher zu liegen als ein Partikel der Fraktion i
P_{hi}	[-]	Wahrscheinlichkeit eines Partikels der Fraktion j tiefer zu liegen als ein Partikel der Fraktion i
p_i	[-]	Siebdurchgang aufsummiert bis zur Fraktion i
Q	[m ³ /s]	Durchfluss
q_B	[m ³ /(m·s)]	auf das Volumen bezogene Geschiebetransportrate
q_{Bi}	[m ³ /(m·s)]	auf das Volumen bezogene Geschiebetransportrate der Fraktion i
Q_{crit}	[m ³ /s]	kritischer Durchfluss
Q_{exp}	[m ³ /s]	Versuchsdurchfluss
R	[m]	hydraulischer Radius
Re_*	[-]	Korn-Reynolds-Zahl
s	[m]	Standardabweichung der Sohlenerhebungen
t	[s]	Versuchszeit
t^*	[-]	dimensionslose Versuchszeit
u	[m/s]	Fließgeschwindigkeit
u_*	[m/s]	Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit
u_G^*	[-]	mittlere dimensionslose Transportgeschwindigkeit
u_{*l}	[m/s]	untere Grenze zur Entwicklung statischer Deckschichten
u_{*t}	[m/s]	Übergang von statischer zu mobiler Deckschicht
u_{*u}	[m/s]	obere Grenze zur Ausbildung statischer Deckschichten
u_m	[m/s]	mittlere Fließgeschwindigkeit
u_T	[m/s]	mittlere Transportgeschwindigkeit des Geschiebes
W^*	[-]	dimensionslose Transportrate
W_i^*	[-]	dimensionslose Transportrate der Fraktion i
W_r^*	[-]	dimensionslose Referenztransportrate nach Parker & Klingeman (1982)
x	[m]	Laufvariable in Fließrichtung

z	[m]	Höhenlage der Sohle
z_i	[m]	Höhenwert der Sohle am Punkt i
\bar{z}	[m]	Mittelwert der Rauheitserhebungen der Sohle
Z_X		Sieblinie der Deckschicht im stabilen Zwischenzustand
α_H	[-]	Vorfaktor der Ausgleichsfunktion nach Hunziker (1995)
β_H	[-]	Exponent der Ausgleichsfunktion nach Hunziker (1995)
Δ_i	[m]	Höhendifferenz zweier benachbarter Partikel
Δp_i	[-]	Gewichtsanteil der Fraktion i
Δp_j	[-]	Gewichtsanteil der Fraktion j
Δx	[m]	Schrittweite in x-Richtung
Δy	[m]	Schrittweite in y-Richtung
ε	[-]	relative Überdeckung
ϕ	[-]	dimensionslose Transportintensität (Einstein, 1950)
ϕ	[-]	dimensionsloser Strömungsangriff (Wilcock & Crowe, 2003)
η	[-]	Konstante in der Transportformel von Einstein (1950)
λ	[-]	Koeffizient zur Berechnung der Schrittweite (Einstein, 1950)
λ_G	[-]	Parameter zur Berücksichtigung von Schubspannungsschwankungen nach Günter (1971)
ν	[m ² /s]	kinematische Viskosität
ρ	[kg/m ³]	Dichte des Fluids
ρ_L	[kg/m ³]	Lagerungsdichte des Sediments
ρ_s	[kg/m ³]	Dichte des Sediments
σ	[-]	Varianz der Sieblinie
σ_G	[-]	geometrische Standardabweichung der Sieblinie
τ_0	[N/m ²]	Sohlenschubspannung
τ_{0c}	[N/m ²]	kritische Sohlenschubspannung
τ_{0cmax}	[N/m ²]	kritische Sohlenschubspannung der Deckschicht maximaler Bettstabilität

τ^*	[-]	Shields-Parameter / dimensionslose Sohlenschubspannung
τ_c^*	[-]	kritischer Shields-Parameter / kritische dimensionslose Sohlenschubspannung
$\tau_{c\ i}^*$	[-]	kritischer Shields-Parameter der Fraktion i
τ_T^*	[-]	auf das Tracerkorn bezogener Shields-Parameter
$\tau_{c\ \sigma}^*$	[-]	kritischer Shields-Parameter für die Korngröße d_σ
$\tau_{crit,D}$	[N/m ²]	kritische Sohlenschubspannung der Deckschicht
τ_m^*	[-]	Shields-Parameter berechnet mit d_m
τ_{ri}	[-]	kritische Schubspannung der Fraktion i unter Berücksichtigung des relativen Herausragens
ξ_i	[-]	Korrekturfaktor nach Wu et al. (2000)
ψ	[-]	Bewegungsintensität (Einstein, 1950)

1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Transport limitierter Geschiebemengen über statischen Deckschichten, welche sich in zahlreichen Gewässerabschnitten kiesführender Flüsse entwickelt haben. Diese Sohlenform entsteht, wenn der natürliche Geschiebetrieb, z.B. durch Querbauwerke, unterbrochen wird. In der Folge findet ein Prozess selektiver Erosion statt, der zu einer Vergrößerung der Sohlenoberfläche bis hin zur Ausbildung einer unter Klarwasserabfluss stabilen statischen Deckschicht führt. Der Geschiebetransport kommt dann beinahe vollständig zum Erliegen. Durch den Eintrag von externem Material kann dennoch ein Geschiebetrieb auftreten, während die Deckschicht unter den herrschenden hydraulischen Randbedingungen stabil ist. Natürliche Quellen für externes Geschiebe können Uferabbrüche, Hangrutschungen, Murgänge und Einträge von Oberstrom nach extremen Hochwasserereignissen sein (Miyazaki et al., 2006; Bartley & Rutherford, 2005; Madej, 2001; Pitlick, 1993; Sutherland et al., 2002). Eine weitere, künstliche Geschiebequelle ist die Schüttung von Geschiebedepots in einen Gewässerabschnitt, mit dem Ziel, die Qualität der morphologischen Gewässerstruktur durch eine Reaktivierung des Geschiebetriebs zu verbessern (Dittrich et al., 2011; Merz et al., 2006; Pasternack et al., 2004; Trush et al., 2000; Wohl & Rathburn, 2003), oder auch die Tiefenerosion eines Gewässerabschnittes auszugleichen bzw. aufzuhalten (Faulhaber & Riehl, 2000; Gölz, 1999; Hengl et al. 2009). Letzteres wird jedoch vorrangig in Strecken angewandt, die keine ausgeprägte Deckschicht aufweisen, sondern von Erosion gekennzeichnet sind.

Die Reaktivierung des Geschiebetriebs im Sinne der ökologischen Verbesserung eines Fließgewässers wird durchgeführt, um die Entstehung morphodynamischer Strukturen wie alternierende Kiesbänke und Kiesinseln zu fördern. Das Ausbleiben dieser Strukturen bei statischen Deckschichten wird aus gewässerökologischer Sicht häufig als eine Verarmung der Strukturvielfalt des Lebensraumes Fließgewässer und somit als Widerspruch zu der Gesetzgebung durch die EU-Wasserrahmenrichtlinie angesehen. Die Richtlinie gibt vor, die Gewässerstruktur aller Fließgewässer bis zum Jahr 2015 in einen ökologisch guten Zustand zu versetzen. Zum Erreichen dieser Vorgabe werden in naher Zukunft zahlreiche Renaturierungsmaßnahmen erforderlich sein, im Zuge derer auch eine Steigerung der Morphodynamik angestrebt wird.

Die Umsetzung eines solchen Vorhabens erfordert eine möglichst zuverlässige Abschätzung der morphologischen Veränderungen, die durch den künstlich herbeigeführten Geschiebetrieb einsetzen. Mögliche Risiken sind die Remobilisierung der statischen Deckschicht, was zu

einer fortschreitenden Tiefenerosion führen kann und eine Veränderung des Fließquerschnitts infolge unerwünschter Sedimentablagerungen, die aus der veränderten Morphodynamik des Flusses resultieren. Zur Erarbeitung belastbarer Prognosen über die Gewässerentwicklung wird deshalb eine möglichst genaue Kenntnis über die Prozesse benötigt, die bei dem Transport von Geschiebe über statischen Deckschichten auftreten. Für das Prozessverständnis ist zum einen die Kenntnis über das Ausbreitungsverhalten einer limitierten Geschiebemenge auf einer statischen Deckschicht und zum anderen des Stabilitätsverhaltens von statischen Deckschichten bei einem darauf stattfindenden Geschiebetransport erforderlich. Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf der Beschreibung der Ausbreitungsvorgänge.

Die Ausbreitung einer limitierten Geschiebemenge ist aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von Material ein hochgradig instationärer Transportprozess, bei dem zu keinem Zeitpunkt ein Gleichgewichtstransport herrschen kann. Deshalb ist eine korrekte Beschreibung der Transportvorgänge mit Formeln, die wie z.B. der Ansatz von Meyer-Peter & Müller (1949) für die Berechnung eines stationären Gleichgewichtstransports entwickelt wurden, nicht möglich.

Die bisher durchgeführten Studien über den Transport einer limitierten Geschiebemenge befassen sich fast ausschließlich mit dem Transport von externem Material bei gleichzeitigem Transport von Sohlenmaterial, d.h. die Sohle und das externe Geschiebe sind in Bewegung. Für diesen Fall liefert die Literatur einige erste Berechnungsansätze. Demgegenüber steht der Transport einer limitierten Geschiebemenge über eine statische Deckschicht, die keinen signifikanten Beitrag zum Geschiebetransport liefert. Die Frage, wie sich eine einmalig zugegebene, begrenzte Geschiebemenge auf der Sohlenoberfläche ausbreitet bleibt in der Literatur weitestgehend unbeantwortet. Ein Ansatz zur Berechnung dieses Ausbreitungsvorgangs ist derzeit nicht verfügbar.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, das Wissen über die Prozesse der Ausbreitung einer limitierten Menge von externem Geschiebe zu erweitern und damit eine Grundlage für einen ersten empirischen Ansatz zu liefern, der die verschiedenen Einflussfaktoren wie Geschiebemenge, Korngröße, Strömungsangriff und Sohlenbeschaffenheit berücksichtigt. Im Rahmen der Untersuchungen wurden am Leichtweiß-Institut für Wasserbau der TU-Braunschweig systematische Laborversuche zur Untersuchung der Ausbreitung eines Geschiebedepots auf statischen Deckschichten und der dafür relevanten Einflussfaktoren durchgeführt.

Der Stand des Wissens über das Widerstandsverhalten bzw. den Bewegungsbeginn bei Strömungsangriff von Sediment ist in Kap. 2 aufbereitet. Dieses Wissen ist die Grundlage für das Verständnis jedes Sedimenttransportvorgangs in Fließgewässern. Ein besonderes Augenmerk

gilt hierbei den statischen Deckschichten. In Kap. 3 wird das vorhandene Literaturwissen über die strömungsinduzierte Ausbreitung einer begrenzten Geschiebemenge zusammengefasst. Für das verbesserte Verständnis der Problematik wird dabei auch auf herkömmliche Ansätze zur Berechnung des Geschiebetriebs und deren Anwendbarkeit auf die Fragestellung dieser Arbeit eingegangen. Ausgehend von dem aufbereiteten Stand des Wissens werden in Kap. 4 die offenen Fragestellungen für die Untersuchungen abgeleitet und in Kap. 5 eine dimensionsanalytische Betrachtung des Untersuchungsgegenstands durchgeführt. Im Anschluss daran werden in Kap. 6 die Laborversuche vorgestellt und die Versuchsergebnisse zunächst dimensionsbehaftet dargestellt. In Kap. 7 wird auf Grundlage der Versuchsergebnisse und des Stands des Wissens ein neuer empirischer Ansatz zur Beschreibung des genannten Transportphänomens formuliert. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit werden in Kap. 8 zusammengefasst und es wird ausblickend geschildert, welche Schritte in folgenden Forschungsarbeiten vorgenommen werden sollten, um das hier gewonnene Wissen zu erweitern.

2 Bewegungsbeginn und Sohlenstabilität

Gegenstand der Untersuchungen ist die Ausbreitung einer limitierten Geschiebemenge über statischen Deckschichten. Die Grundvoraussetzung für jeden Feststofftransport in Fließgewässern ist, dass das transportierte Material zunächst durch die Strömungskräfte in Bewegung versetzt wird. Deshalb werden in diesem Kapitel die erforderlichen Grundlagen zum Strömungsangriff und zum Widerstand, den das Sediment der Strömung entgegensetzt, erläutert. Das Verhältnis der angreifenden Kräfte aus der Strömung und der widerstehenden Kräfte ist dafür entscheidend, ob eine Gewässersohle oder ein darauf liegendes Korn in Bewegung oder in Ruhe ist. Im Folgenden werden zunächst allgemein der Bewegungsbeginn und die Stabilität von locker gelagerten Materialien betrachtet. Da die Untersuchungen den Transport von Geschiebe über eine in Ruhe befindliche Sohle betreffen, werden weiterhin die Entstehung und das Stabilitätsverhalten von Deckschichten erläutert.

2.1 Bewegungsbeginn

Der Widerstand eines Korns gegenüber einem Strömungsangriff wird allgemein als Sohlenstabilität bezeichnet. Auf ein Einzelkorn einer Sohle bezogen ist dies die Kraft, die ein Sedimentkorn dem Strömungsangriff entgegensetzt, bevor es in Bewegung gerät. In Abb. 2.1 sind die Kräfte, die auf ein Korn wirken, schematisiert dargestellt. Dabei stehen die Gewichtskraft F_G und die Reibungskraft R_G der aus der Strömung resultierenden Schubkraft F_τ und der Liftkraft F_L entgegen.

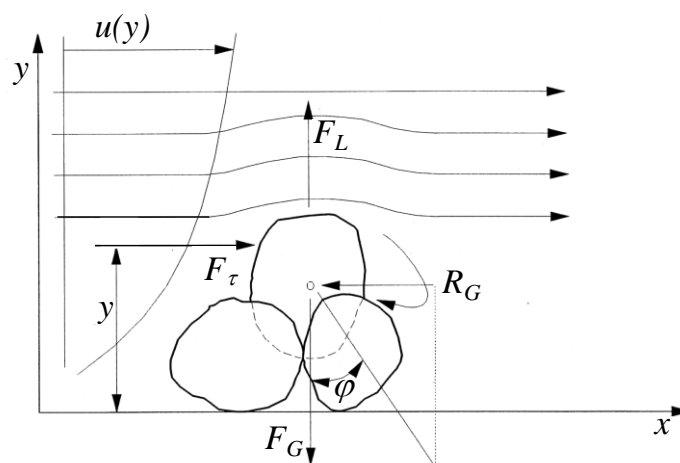


Abb. 2.1: Angreifende Kräfte an ein Einzelkorn (aus Dittrich et al., 1992, modifiziert)

Die Resultierende der auf das Korn wirkenden Kräfte wird allgemein hin in Form einer Schubspannung ausgedrückt. Eine Gewässersohle ist stabil, solange die angreifende Sohlen Schubspannung τ_0 kleiner ist, als die widerstehende kritische Schubspannung τ_{0c} des ange-

strömten Materials. Der Grenzzustand, bei dem die angreifenden Kräfte und die widerstehenden Kräfte im Gleichgewicht sind, wird als Bewegungsbeginn bezeichnet (Shields, 1936).

Die Sohlenschubspannung ist für breite Gewässer eine Funktion der Dichte des Fluids ρ , der Erdbeschleunigung g , der Fließtiefe h und der Neigung des Energieliniengefälles I_E :

$$\tau_0 = \rho \cdot g \cdot h \cdot I_E \quad (2.1)$$

In schmalen Gewässern ist in Gl. (2.1) anstelle der Fließtiefe h der hydraulische Radius $R = A/U$ zu einzusetzen. Die Widerstandskraft bzw. die kritische Sohlenschubspannung ist eine Funktion der sedimentologischen (z.B. Korngröße und -dichte) und morphologischen (z.B. Kornform und -verteilung) Eigenschaften eines Materials (z.B. Dittrich, 1998, Koll, 2002). Sie beschreibt die Grenze, ab der eine Gewässersohle durch die Strömungskräfte in Bewegung gesetzt wird. Für die Bestimmung der kritischen Schubspannung sind bis heute der Ansatz von Shields (1936) bzw. darauf aufbauende Erweiterungen dieses Ansatzes am gebräuchlichsten. Im Folgenden werden der Ansatz von Shields (1936) sowie die Faktoren erläutert, die einen signifikanten Einfluss auf den Bewegungsbeginn haben.

2.1.1 Bewegungsbeginn von locker gelagerten Materialien

Shields (1936) leitete aus dem Kraftansatz (Abb. 2.1) unter Vernachlässigung der Liftkraft die dimensionslose kritische Schubspannung τ_c^* für den Bewegungsbeginn ab. Er beschreibt das Verhältnis der antreibenden Strömungskraft F_τ zur Reibungskraft des Einzelkornes R_G . Die zugrunde liegenden Untersuchungen wurden mit Einkornmaterialien mit Korndurchmessern von 0,1 bis 5 mm durchgeführt. Die Dichte des untersuchten Sediments variierte im Bereich von 1060 - 4250 kg/m³. Shields (1936) unterscheidet weiterhin kantige, scharfkantige und natürlich gerundete Kornformen.

Die dimensionslose Schubspannung τ^* , die in der Literatur auch Shields-Parameter genannt wird, berechnet sich nach Shields (1936) zu:

$$\tau^* = \frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d} = \frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot I_E}{(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d_{ch}} \quad (2.2)$$

Die Ergebnisse seiner Untersuchungen fasste Shields (1936) in einem Diagramm zusammen, in dem er die dimensionslose kritische Schubspannung τ_c^* als Funktion der Kornreynoldszahl Re_* (Gl. 2.3) darstellt, vgl. Abb. 2.2.

$$Re_* = \frac{u_* \cdot d}{\nu} \quad (2.3)$$

Die Formel beschreibt das Verhältnis der Höhe der viskosen Grenzschicht zum Korndurchmesser d . Darin enthalten sind die Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit $u_* = (g \cdot h \cdot I_E)^{1/2}$ und die kinematische Viskosität des transportierenden Fluids ν .

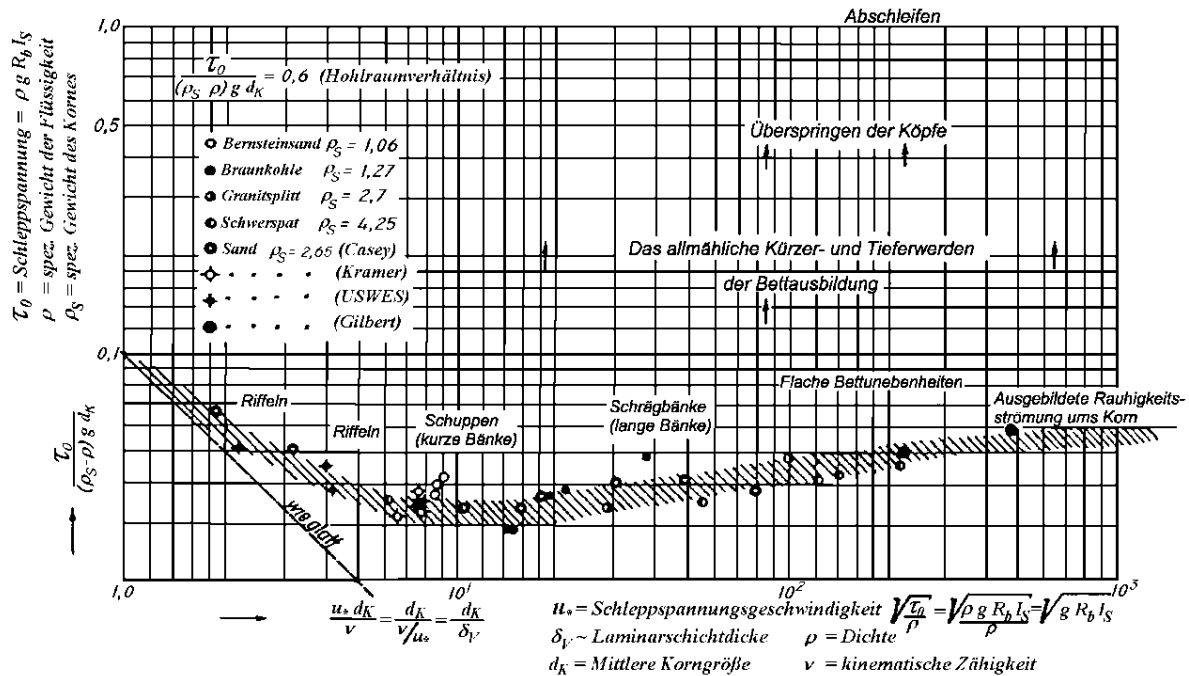


Abb. 2.2: Shields-Diagramm (aus Shields, 1936, korrigiert)

In dem Diagramm werden drei verschiedene Bereiche unterschieden: der Bereich unterhalb der Kurve, d.h. die dimensionslose kritische Schubspannung τ_c^* ist unterschritten und es findet keine Bewegung statt, der Bereich des Bewegungsbeginns bei dem der kritische Shields-Parameter gerade erreicht ist, und der Bereich oberhalb der Kurve, d.h. τ_c^* ist überschritten und es liegt Bewegung vor.

Über einer vollkommen rauen Sohle ist der Einfluss der viskosen Grenzschicht vernachlässigbar, so dass das Korn vollständig der turbulenten Strömung ausgesetzt ist (z.B. Dittrich, 1998, Koll, 2002). In diesem Bereich weist der kritische Shields-Parameter einen konstanten Wert auf. Dieser Wert ist in der Regel für den Bewegungsbeginn von rauen Kiessohlen maßgeblich, da hier meist eine voll turbulente Strömung vorliegt. Die objektive Feststellung des Bewegungsbeginns ist jedoch sehr schwierig, weshalb in der Literatur zahlreiche unterschiedliche Werte für den Shields-Parameter angegeben werden. Shields (1936) selbst gibt die Grenzen $\tau_c^* = 0,03$ für den Zustand der absoluten Ruhe, d.h. kein Korn ist in Bewegung, und $\tau_c^* = 0,06$ für den Bewegungsbeginn an. Die wohl gebräuchlichste Empfehlung stammt von Meyer-Peter & Müller (1949) mit $\tau_c^* = 0,047$. Weitere Empfehlungen für den Zahlenwert des Shields-Parameters können z.B. der Studie von Buffington & Montgomery (1997) entnommen wer-

den. Sie enthält eine umfassende Übersicht über bisherige Forschungsergebnisse zum Bewegungsbeginn.

2.1.2 Bewegungsbeginn von Korngemischen

Ein Korngemisch besteht aus verschiedenen Fraktionen, die als Einkornmaterial jeweils einen unterschiedlichen Bewegungsbeginn aufweisen. Nach Schöberl (1981) wird die Grenze zwischen einer Kornmischung und einem Einkornmaterial durch eine geometrische Standardabweichung der Sieblinie von $\sigma_G \geq 1,35$ gekennzeichnet. Sie berechnet sich nach Gl. (2.4) aus den Korndurchmessern d_{16} , bei 16 % Siebdurchgang und d_{84} , bei 84 % Siebdurchgang, zu:

$$\sigma_G = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} . \quad (2.4)$$

Der Bewegungsbeginn eines Korngemisches wird im Allgemeinen nicht für die einzelnen Fraktionen berechnet, sondern es wird hierfür eine mittlere kritische Schubspannung bestimmt. Bei der Berechnung der kritischen Schubspannung wird davon ausgegangen, dass das Korngemisch mit einem charakteristischen Korndurchmesser beschrieben werden kann, und dass alle Fraktionen bei der gleichen Sohlenschubspannung in Bewegung gesetzt werden. Als geeigneter charakteristischer Korndurchmesser hat sich, neben dem Korndurchmesser bei 50 % Siebdurchgang d_{50} , der nach Meyer-Peter & Müller (1949) berechnete mittlere Korndurchmesser d_m durchgesetzt. Er berechnet sich mit Gl. (2.5) zu:

$$d_m = \sum_{i=1}^n d_i \cdot \Delta p_i . \quad (2.5)$$

Der Korndurchmesser d_i ist der gemittelte Durchmesser der Fraktion i der Sieblinie (siehe Abb. 2.3), der prozentuale Anteil Δp_i ist der Gewichtsanteil der Fraktion i am Korngemisch. Mit dem charakteristischen Korndurchmesser d_m lässt sich der Bewegungsbeginn einer ebenen, locker gelagerten Sohle aus einem Korngemisch mit dem Shields-Diagramm oder einer abgewandelten Form davon in guter Näherung bestimmen. Eine Aussage über den Bewegungsbeginn einer einzelnen Fraktion auf einer Sohle lässt sich damit jedoch nicht treffen.

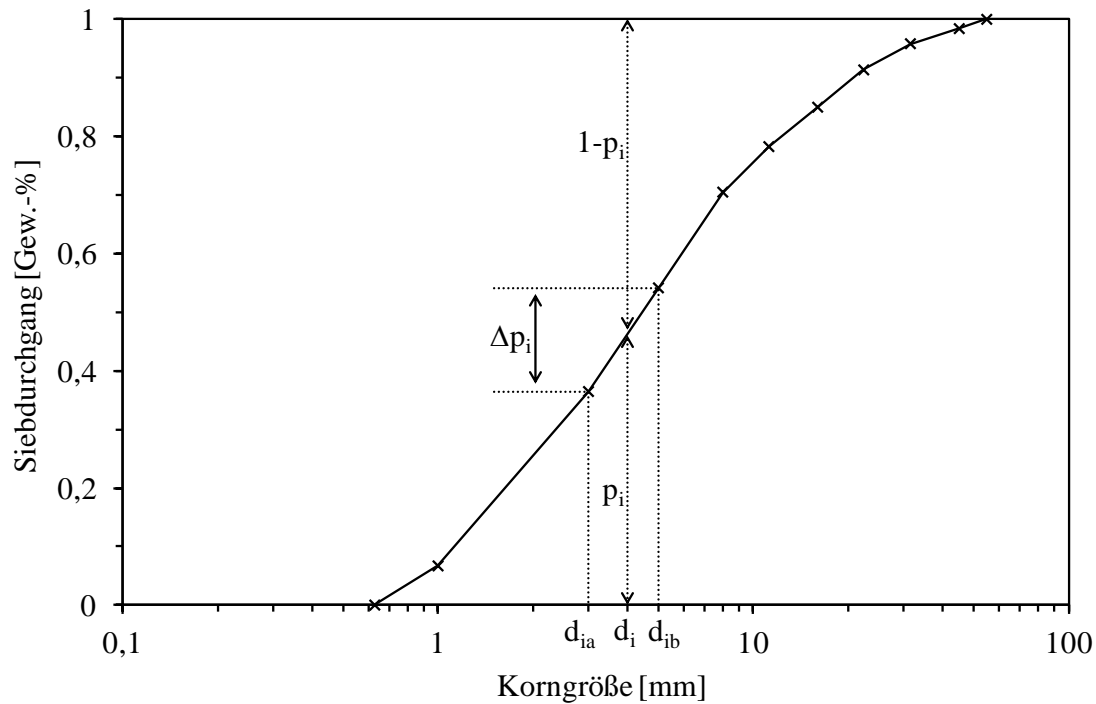


Abb. 2.3: Parameter einer Sieblinie

Die verschiedenen Kornfraktionen in einem Gemisch stehen zueinander in einer Wechselwirkung. Die äußert sich dahingehend, dass Fraktionen mit $d_i < d_{50}$ scheinbar eine höhere kritische Schubspannung als das entsprechende Einkornmaterial aufweisen und bei Fraktionen mit $d_i > d_{50}$ scheinbar geringere Schubspannungen für den Bewegungsbeginn benötigt werden als bei entsprechenden Einkornmaterialien (Egiazaroff, 1965). Die Ursache hierfür liegt darin, dass kleine Körner im Lückensystem zwischen den größeren Körnern abgeschattet werden und dadurch nicht direkt dem Strömungsangriff ausgesetzt sind (z.B. Duan & Scott, 2007; Hunziker, 1995; Wu et al., 2000). Große Körner hingegen können aus der Sohle herausragen und sind damit den Strömungskräften stärker ausgesetzt. In Abb. 2.4 ist das Herausragen eines Korns aus einem Korngemisch um das Maß Δi skizziert.

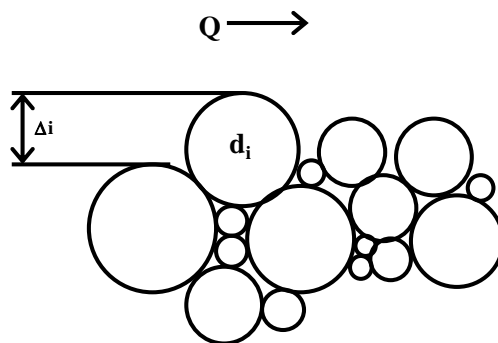


Abb. 2.4: Relatives Herausragen eines Korns d_i aus einem Korngemisch

Ein weiterer Grund für die höhere Mobilität der größeren Kornanteile liegt in der Erosion der feineren Anteile, und damit des Widerlagers (Wilcock & McArde, 1993). Bezogen auf die Mobilisierung eines einzelnen Korns ist also nicht der mittlere Strömungsangriff, sondern die Strömungskraft relevant, die direkt auf das Korn einwirkt (Buscombe & Conley, 2012). Die Berücksichtigung des Einflusses der Exponiertheit eines Korns erfolgt jedoch meist durch eine Korrektur der dimensionslosen kritischen Schubspannung $\tau_{c\ i}^*$ des betrachteten Korns der Fraktion i (z.B. Fenton & Abbott, 1977; Gaeuman et al., 2009; Hunziker, 1995; Measures & Tait, 2008; Misri et al. 1984; Wu et al., 2000; Wu & Chou, 2003; Wu & Yang 2004).

Egiazaroff (1965) leitete aus Untersuchungen Gl. (2.6) zur Berechnung des kritischen Shields-Parameters $\tau_{c\ i}^*$ einer Kornfraktion mit dem Durchmesser d_i eines bewegten Korngemisches ab:

$$\tau_{c\ i}^* = \frac{0,1}{\left(\log 19 \left(\frac{d_i}{d_{avg}} \right) \right)^2}. \quad (2.6)$$

Als Referenzwert für den mittleren Bewegungsbeginn verwendete Egiazaroff (1965) den Korndurchmesser d_{avg} mit einem kritischen Shields-Parameters von $\tau_c^* = 0,06$, wobei d_{avg} der Mittelwert aus dem betrachteten Korndurchmesser d_i und dem mittleren Korndurchmessers d_m des Kiesgemisches ist. Aus der Formel ergibt sich, dass τ_c^* für Korngrößen, die kleiner sind als der mittlere Korndurchmesser, größer wird und für Körner, die größer sind, kleiner wird. Die Ergebnisse von Egiazaroff (1965) werden in einer Studie zum Einfluss der Sieblinienweite von Wilcock & Southard (1988) bestätigt. Laut Wilcock & Southard (1988) können sowohl der Anteil der einzelnen Fraktionen als auch die Weite der Sieblinie bei der Abschätzung des Bewegungsbeginns vernachlässigt werden. Shvidchenko et al. (2001) zufolge sollte jedoch ebenfalls die geometrische Standardabweichung der Sieblinie σ_G berücksichtigt werden. Patel et al. (2009) entwickelten einen Stabilitätsansatz (Gl. 2.7) der die Standardabweichung des Sohlensediments berücksichtigt:

$$\frac{\tau_{c\ i}^*}{\tau_{c\ \sigma}^*} = 1,0541 \cdot \left(\frac{d_i}{d_\sigma} \right)^{-0,7458}. \quad (2.7)$$

mit:

$$\tau_{c\ \sigma}^* = 0,0329 \cdot \sigma_G^{-0,5691}.$$

Die Korngröße d_σ ist nach Patel et al. (2009) wie folgt definiert:

$$d_\sigma = d_m \cdot \sigma_G. \quad (2.8)$$

Hierin ist d_m der mittlere Korndurchmesser (Gl. 2.5) und σ_G die geometrische Standardabweichung der Sieblinie (Gl. 2.4).

Hunziker (1995) entwickelte mit Gl. (2.9) einen Ansatz, der auf der Korngröße d_i der betrachteten Fraktion und dem mittleren Durchmesser der Sohle $d_{m,S}$ sowie dem bereits von Meyer-Peter & Müller (1949) zur Berücksichtigung von Sohlenunebenheiten eingeführten Faktor $(k_{St}/k_r)^{1,5}$ basiert:

$$\tau_{c\ i}^* = \alpha_H \cdot \left(\frac{d_i}{d_{m,S}} \right)^{-\beta_H} \cdot \tau_c^*, \quad (2.9)$$

mit:

$$\beta_H = 0,011 \cdot \left(\tau_m^* \cdot \left(\frac{k_{St}}{k_r} \right)^{1,5} \right)^{-1,5} - 0,3,$$

$$\alpha_H = 0,73 = \text{const.}$$

τ_m^* ist die mittlere dimensionslose Schubspannung, die auf die Sohle wirkt. Sie wird mit Gl. (2.2) für den mittleren Korndurchmesser der Sohlenoberfläche $d_{m,S}$ berechnet. Den Shields-Parameter nimmt Hunziker (1995) in seinen Untersuchungen zu $\tau_c^* = 0,05$ an.

Die Rauheit k_{St} des umgebenden Gerinnes wird mit der Gauckler-Manning-Strickler Formel berechnet:

$$u_m = k_{St} \cdot R^{2/3} \cdot I_E^{1/2} \quad (2.10)$$

Für den auf die betrachtete Fraktion i bezogenen Strickler-Beiwert wird die von Meyer-Peter & Müller (1949) formulierte Gleichung

$$k_r = \frac{26}{\sqrt[6]{d_{90}}} \quad (2.11)$$

verwendet.

Die Vorgehensweise von Wu et al. (2000) zur Berücksichtigung des relativen Herausragens, die ebenfalls in den Arbeiten von Wu & Chou (2003) und Wu & Yang (2004) Anwendung findet, geht von einer gleichförmigen Wahrscheinlichkeitsverteilung für das Herausragen Δ_i

eines Korns der Fraktion i aus. Basierend auf der Wahrscheinlichkeit P_{ei} eines Korns mit dem Durchmesser d_i höher als ein Korn d_j und der Wahrscheinlichkeit P_{hi} , tiefer zu liegen, wird der Korrekturfaktor ξ_i für die dimensionslose kritische Schubspannung $\tau_{c,i}^*$ nach Gl. (2.12) berechnet:

$$\xi_i = \left(\frac{P_{ei}}{P_{hi}} \right)^m. \quad (2.12)$$

Der Exponent wurde für Sand-Kies-Gemische empirisch zu $m = -0,6$ bestimmt. Die beiden Wahrscheinlichkeiten $P_{ei,j}$ und $P_{hi,j}$ berechnen sich nach Gl. (2.12a) zu:

$$P_{ei,j} = \Delta p_j \cdot \frac{d_i}{d_i + d_j}, \quad (2.12a)$$

$$P_{hi,j} = \Delta p_j \cdot \frac{d_j}{d_i + d_j}.$$

Hierin ist Δp_j der prozentuale Gewichtsanteil der Fraktion j an dem gesamten Sohlenmaterial. Die Aufsummierung des Ergebnisses aus Gl. (2.12a) für alle Fraktionen des Sohlenmaterials führt zu den Gesamtwahrscheinlichkeiten P_{ei} und P_{hi} eines Korns d_i dafür, höher bzw. niedriger als ein benachbartes Korn der Kiesmischung zu liegen und berechnet sich demnach wie folgt:

$$P_{ei} = \sum_{j=1}^n \Delta p_j \cdot \frac{d_i}{d_i + d_j}, \quad (2.12b)$$

$$P_{hi} = \sum_{j=1}^n \Delta p_j \cdot \frac{d_j}{d_i + d_j}.$$

Die kritische dimensionslose Schubspannung der Fraktion i eines Korngemisches berechnet sich damit nach Wu et al. (2000) zu:

$$\tau_{c,i}^* = \tau_c^* \cdot \xi_i \quad (2.13)$$

Den dimensionslosen Shields-Parameter nehmen Wu et al. (2000) zu $\tau_c^* = 0,03$ an. Sie begründen dies mit den Ergebnissen einer Studie von Misri et al. (1984), in der der Shields-Parameter anhand von Versuchsdaten unter Verwendung der Formel von Egiazaroff (1965) zu $\tau_c^* = 0,023-0,303$ bestimmt wurde.

Die vorgestellten Untersuchungen zum Einfluss der Exponiertheit auf den Bewegungsbeginn beziehen sich ausschließlich auf den Bewegungsbeginn einer Fraktion i eines locker gelager-

ten Korngemisches. Der Fall, dass Material über eine stabile umgebene Sohle transportiert wird, wird mit diesen Ansätzen nicht erfasst.

2.1.3 Einfluss der Liftkraft

Die von Shields (1936) vernachlässigte Liftkraft (vgl. Abb. 2.1) ist ein wesentlicher Faktor für die Mobilisierung von Partikeln, die tiefer in das Sohlengefüge eingebettet sind (z.B. Best, 1993; Dittrich, 1992; Dittrich, 1998; Jüppner, 1993; Nelson et al., 2000; Patnaik et al., 1994; Schmeeckle et al., 2007; Vollmer & Kleinhans, 2007; Wu & Yang, 2004). Sie entsteht durch Geschwindigkeitsunterschiede und damit durch Druckunterschiede im Fluid (Dittrich et al., 1992; Aberle, 2000) sowie durch die Turbulenz der Strömung (Lee & Balachandar, 2012; Schmeeckle et al., 2007; Vollmer & Kleinhans, 2007). Die Liftkraft kann zum Herausheben eines Korns aus einer Sohlenoberfläche führen und damit die Mobilisierung des Korns begünstigen. Jüppner (1993) und Patnaik et al. (1994) folgerten aus Untersuchungen, dass ein Zusammenhang zwischen dem relativen Herausragen eines betrachteten Korns und dem Verhältnis der Liftkraft F_L zur Strömungskraft F_τ besteht. Je tiefer ein Korn in der Sohle liegt, desto größer ist der Anteil der Liftkraft am Bewegungsbeginn (z.B. Dittrich, 1996, Koll 2002). Jüppner (1993) gibt hierfür einen Bereich von $F_L/F_\tau = 0,5 - 1,6$ an. Der relative Anteil der Liftkraft wird dabei nach Dittrich et al. (1996) und Patnaik et al. (1994) mit zunehmender Rauheit kleiner.

Auf eine detailliertere Betrachtung der Liftkraft wird an dieser Stelle verzichtet, da die Messmethodik der in Kap. 6 beschriebenen Versuche keine differenzierte Betrachtung der Liftkraft erlaubt. Es wird deshalb auf Modelle für den Bewegungsbeginn zurückgegriffen, die diese implizit beinhalten.

2.1.4 Einfluss der relativen Überdeckung

Die relative Überdeckung eines Korns wurde bereits von Shields (1936) als eine weitere Einflussgröße auf den Bewegungsbeginn identifiziert. Sie beschreibt das Verhältnis der Fließtiefe h bzw. des hydraulischen Radius R zum Durchmesser des Korns d .

Koll (2002) stellte fest, dass geringe relative Überdeckungen über rauen Sohlen zu einer schwächeren Ausbildung der turbulenten Strömung führen und dass eine Deformation des logarithmischen Geschwindigkeitsprofils auftritt. Nach Bezzola (2002) resultieren aus der Veränderung des logarithmischen Geschwindigkeitsprofils geringere Fließgeschwindigkeiten, die damit auch zu einem geringeren Strömungsangriff führen. Das bedeutet, dass bei geringen Fließtiefen der Strömungsangriff überschätzt wird, was scheinbar zu einer höheren widerste-

henden Kraft der Sohle führt. Umgekehrt betrachtet bedeutet dies für die Berücksichtigung des Effekts durch den Shields-Parameter τ_c^* , dass bei geringen relativen Überdeckungen höhere Werte für τ_c^* angenommen werden müssen.

Aufgrund der festgestellten Beeinflussung des Bewegungsbeginns durch die relative Überdeckung legte Shields (1936) die Gültigkeit seines Diagramms (Abb. 2.2) für Verhältnisse von $R/d \geq 40$ fest. Suszka (1991) stellte hingegen fest, dass bereits ab einem Wert von $h/d_{50} > 15$ davon ausgegangen werden kann und der Einfluss der relativen Überdeckung auf den Bewegungsbeginn vernachlässigbar ist. Zur Berücksichtigung der relativen Überdeckung bei der Berechnung des Bewegungsbeginns schlägt Suszka (1991) den in Gl. (2.14) gegebenen empirisch ermittelten funktionalen Zusammenhang zur Korrektur des kritischen Shields-Parameters vor:

$$\tau_c^* = 0,0851 \cdot \left(\frac{h_c}{d_{50}} \right)^{-0,266} \quad (2.14)$$

2.2 Deckschichten

Ausgehend von einer locker gelagerten Kiessohle mit ausreichend weiter Sieblinie (Schöberl, 1981) können sich nach Überschreiten der kritischen Schubspannung stabile Sohlenformen bilden. Der Prozess dieser Selbststabilisierung der Sohle wird als Deckschichtbildung bezeichnet. Abhängig von dem Geschiebedargebot und den hydraulischen Randbedingungen können sich hierbei statische Deckschichten (engl.: static armour layer) oder mobile Deckschichten (engl.: pavement oder mobile armour layer) ausbilden. Jain (1990) stellt die verschiedenen Stufen der Deckschichtbildung in Abhängigkeit vom Strömungsangriff und dem Geschiebeangebot dar (Abb. 2.5).

Der Strömungsangriff wird dabei durch die Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit u_* charakterisiert. Nach Überschreiten des kritischen Strömungsangriffs der ursprünglichen Sohle u_{*l} findet eine selektive Erosion des Fein- und Mittelkornanteils statt, während die gröberen Kornfraktionen stabil bleiben. Wenn gleichzeitig der Geschiebeeintrag von Oberstrom vernachlässigbar klein ist, geht der Geschiebeaustrag aus dem Gewässerabschnitt trotz anhaltendem Strömungsangriff mit der Zeit auf nahezu null zurück (z.B. Koll, 2002; Mao et al., 2009). Die so entstandene Sohlenoberfläche mit gröberer Sieblinie als das Ursprungsmaterial wird als statische Deckschicht bezeichnet. Auch wenn für einen spezifischen Abfluss kein weiterer Transport mehr stattfindet, ist die Sohle dennoch grundsätzlich als mobil zu betrachten (z.B. Haschenburger & Wilcock, 2003; Pitlick et al., 2008; Wilcock & DeTemple, 2005).

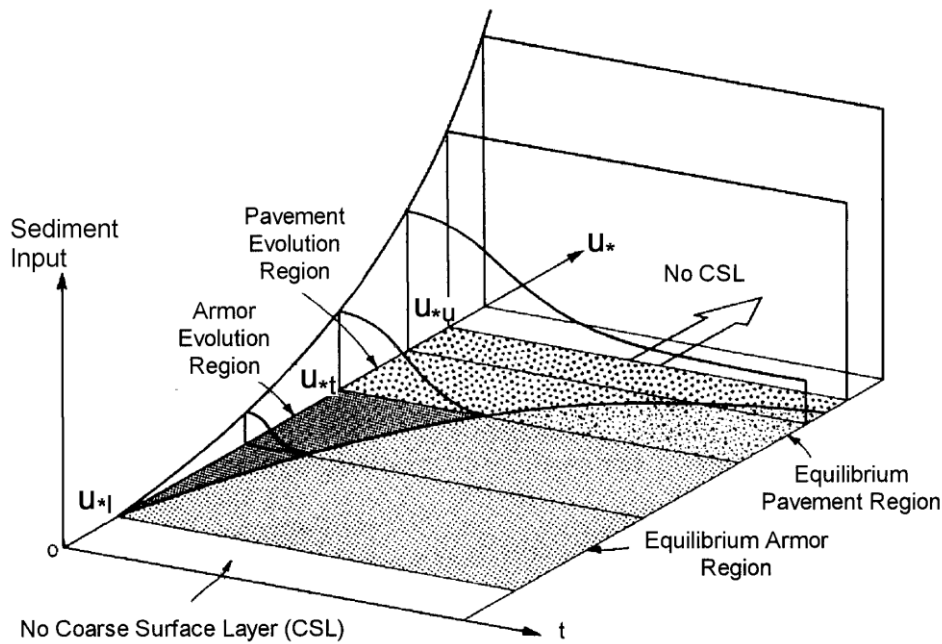


Abb. 2.5: Grenzen der Entwicklung von statischen und mobilen Deckschichten (Jain, 1990)

Eine weitere Steigerung des Strömungsangriffs führt zu einer zunehmenden Vergröberung der Deckschicht. Nach der Remobilisierung der Deckschicht kann sich diese bis hin zu dem oberen Grenzwert für den Strömungsangriff, der in dem Diagramm als u_{*t} angegeben ist, wieder stabilisieren. Bei Überschreiten dieses Grenzwertes und bei einem weiterhin vernachlässigbaren Geschiebeeintrag von Oberstrom reagiert die Sohle mit einer Reduzierung des Längsgefälles, was wiederum zu einer Reduzierung der Sohlenschubspannung und einer erneuten Stabilisierung der Sohle führt. Unter der Voraussetzung, dass der Geschiebeeintrag in einen Gewässerabschnitt ausreichend groß ist, kann sich unter partiellem Transport ein Transportgleichgewicht ausbilden, d.h. alle Fraktionen sind in Bewegung, aber mit einer gegenüber der Sieblinie des Sohlenmaterials veränderten Zusammensetzung (Mao et al., 2011; Wilcock, 1997, 2001). Durch vertikale Sortierungsprozesse (Parker & Klingeman, 1982) vergrößert sich die Sohlenoberfläche und kann einem größeren Strömungsangriff widerstehen. Im Gegensatz zur statischen Deckschicht ist die Sohlenoberfläche allerdings in Bewegung. Dieser Stabilitätszustand wird mobile Deckschicht genannt. Bei einer weiteren Steigerung des Strömungsangriffs geht der partielle Transport in den vollen Transport über und es kann sich keine Deckschicht mehr ausbilden. Bei ausreichendem Geschiebeeintrag von Oberstrom können sich ein Transportgleichgewicht und damit eine stabile Sohlenlage ausbilden. Im anderen Fall setzt Tiefenerosion ggf. verbunden mit einer Gefälleabnahme ein, die erst zum Stehen kommt, wenn der Strömungsangriff so weit reduziert ist, dass sich eine statische Deckschicht ausbil-

den kann. Im Folgenden wird nur noch auf statische Deckschichten eingegangen, da sie die Grundlage für die in dieser Arbeit beschriebenen Untersuchungen bilden.

2.2.1 Statische Deckschicht

Statische Deckschichten sind eine der häufigsten Sohlenformen kiesführender Gewässer, die sich ausbilden, wenn in einem Gewässerabschnitt die Strömung ausreichend stark ist, um das Ausgangsmaterial zu transportieren und der Geschiebeeintrag in diesen Gewässerabschnitt vernachlässigbar klein ist (vgl. Kap. 2.2). Eine Eigenschaft von statischen Deckschichten ist, dass trotz anhaltendem Strömungsangriff praktisch keine Erosion der Sohle mehr stattfindet solange die kritische Sohlenschubspannung der Deckschicht nicht überschritten wird. Damit ist auch der Geschiebetransport aus dem Gewässerabschnitt vernachlässigbar. Da in der Natur der Transport von Geschiebe jedoch nie auf null zurückgehen wird, ist ein Grenzkriterium erforderlich, das den Bewegungsbeginn definiert. Ein geeignetes Kriterium liefert der Vergleich der dimensionslosen Transportrate W^* mit der dimensionslosen Referenztransportrate W_r^* (Koll, 2002; Müller et al., 2005; Parker & Klingeman 1982; Wilcock & Crowe, 2003). Die dimensionslose Transportrate ist nach Parker et al. (1982) definiert zu:

$$W^* = \frac{\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) \cdot q_B}{\sqrt{g} (h \cdot I)^{1,5}} \quad (2.15)$$

Hierbei ist q_B die volumetrische Geschiebetransportrate [$\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$]. Die Grenze zwischen Ruhe und Bewegung wurde von Parker & Klingeman (1982) zu $W_r^* = 0,00218$ definiert und korrespondiert mit einem kritischen Shields-Parameter von $\tau_c^* = 0,0386$.

Bei der Deckschichtbildung findet eine Ausrichtung und optimale Einbettung des Sohlenmaterials statt. Die Körner richten sich dabei hauptsächlich mit ihrer längsten Achse in Fließrichtung und mit der mittleren Achse quer zur Fließrichtung aus (Aberle & Nikora, 2006; Allan, 1982; Komar & Li, 1986). Es entsteht ein Korngefüge, in dem größere Körner in die kleineren Fraktionen eingebettet sind und sich die verschiedenen Korngrößen, vom Kleinst- bis zum Größtkorn, gegenseitig abstützen, so dass sie trotz anhaltendem Strömungsangriff nicht abtransportiert werden. Dieses Korngefüge hat eine Schichtstärke von einem Korndurchmesser der maximalen Korngröße und wird als Deckschicht bezeichnet. Die Deckschicht enthält, mit veränderter Sieblinie, jede Kornfraktion des Ausgangsmaterials und weist dabei eine erheblich gröbere Kornverteilung und damit höhere kritische Schubspannung auf, als das Ausgangsmaterial. Das unterhalb der Deckschicht liegende Ausgangsmaterial, Abb. 2.6, das auch

Unterschichtmaterial genannt wird, wird so lange vor einer weiteren Erosion geschützt, bis die kritische Sohlenschubspannung der Deckschicht überschritten wird.

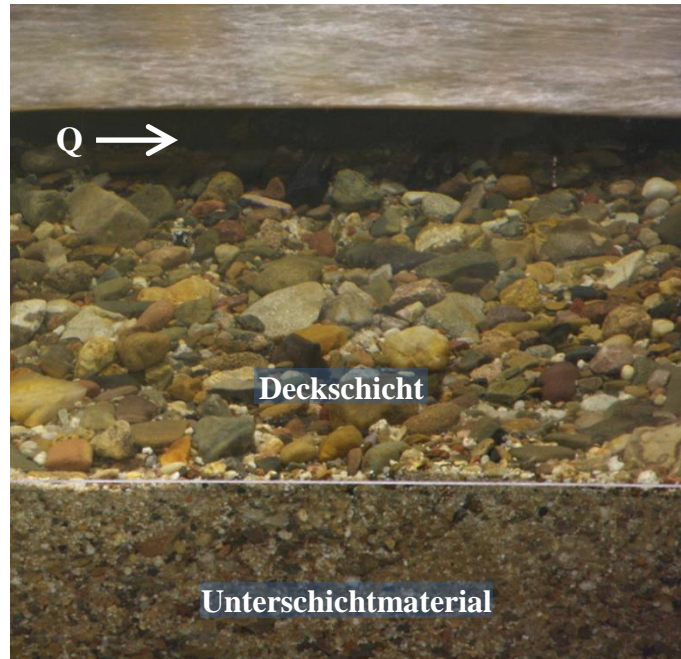


Abb. 2.6: Deckschichtbildung in der hydraulischen Kipprinne

Grundsätzlich kann bei Ausbleiben von Geschiebeeintrag in einen Gewässerabschnitt aus jeder Kieselsohle eine Deckschicht gebildet werden. Voraussetzung ist jedoch, wie bereits erwähnt, dass das Ausgangsmaterial eine ausreichend weite Sieblinie aufweist. Die Weite einer Sieblinie wird entweder durch ihre Varianz σ oder durch ihre Standardabweichung σ_G charakterisiert. In Tab. 2.1 sind der Literatur entnommene Grenzkriterien für die Abpflasterungsfähigkeit einer Kiesmischung zusammengestellt:

Tab. 2.1: Kriterien zur Abschätzung der Abpflasterungsfähigkeit von Kiesmischungen (nach Dittrich, 1998)

Autor	Kriterium
Gessler (1965)	$\sigma = d_{84}/d_{50} > 2$
Little und Mayer (1976)	$\sigma_G = (d_{84}/d_{16})^{1/2} \geq 1,3$
Chin (1985)	$\sigma = d_{84}/d_{50} \geq 1,5$ und $d_{\max}/d_{50D} \geq 1,8$
Schöberl (1981)	$\sigma_G = (d_{84}/d_{16})^{1/2} \geq 1,35$, $d_{90}/d_{50} > 1,55$ und $d_{mD}/d_{50} \geq 1,05$

Als gebräuchlichstes Kriterium hat sich der von Schöberl (1981) angegebene Wert für die Standardabweichung der Ausgangskiesmischung $\sigma_G \geq 1,35$ durchgesetzt.

Für jede Kornmischung existiert ein maximaler Strömungsangriff bis zu dem sich statische Deckschichten ausbilden können (Abb. 2.5). Die statische Deckschicht, die sich unter diesem Strömungsangriff ausbildet wird als Deckschicht mit maximaler Stabilität bezeichnet. Ihre Kornzusammensetzung hängt von der Sieblinie des Ausgangsmaterials ab. Günter (1971) entwickelte ein Gleichungssystem, mit dem die Kornzusammensetzung der statischen Deckschicht mit maximaler Stabilität auf Grundlage des Ausgangsmaterials berechnet werden kann.

$$\Delta p(D_x)_i = \frac{\Delta p(D_F)_i \left(\frac{\Delta p(A_x)_i}{\Delta p(A_F)_i} \right)^{\left(\frac{1-p(A_F)_i}{1-p(A_x)_i} \right)}}{\sum_{i=1}^n \left[\Delta p(D_F)_i \left(\frac{\Delta p(A_x)_i}{\Delta p(A_F)_i} \right)^{\left(\frac{1-p(A_F)_i}{1-p(A_x)_i} \right)} \right]} \quad (2.16)$$

mit:

$$\Delta p(A_F)_i = \sqrt{\frac{d_i}{d_{\max}}} \quad \text{und} \quad \Delta p(D_F)_i = 0,67 \cdot \left(\frac{d_i}{d_{\max}} \right)^3 + 0,33 \frac{d_i}{d_{\max}}$$

Darin sind A_x die Sieblinie der Ausgangsmischung, D_x die Sieblinie der Deckschicht im Zustand maximaler Sohlenstabilität, A_F die Sieblinie der Fullerkurve (Kornverteilung mit der größtmöglichen Lagerungsdichte) und D_F die Sieblinie der zur Fullerkurve gehörenden Deckschicht mit maximaler Stabilität. Der Durchmesser d_i ist der mittlere Korndurchmesser der Fraktion i , Δp_i ist der prozentuale Anteil der Fraktion i und p_i ist der Siebdurchgang bei der Korngröße d_i (vgl. Abb. 2.3).

Die nach Günter (1971) berechnete Sieblinie D_x der Deckschicht maximaler Stabilität tritt in der Natur praktisch nie auf (vgl. Koll, 2002). Im Regelfall bilden sich in der Natur Deckschichten im stabilen Zwischenzustand Z_x aus, die unter einem Strömungsangriff entstanden sind, der kleiner ist, als der maximale Strömungsangriff zur Deckschichtbildung (vgl. Abb. 2.5). Diese Deckschichten weisen eine Sieblinie auf, die deutlich gröber als die der Ausgangsmischung A_x aber feiner als die der Deckschicht maximaler Stabilität D_x ist. In Abb. 2.7

sind exemplarisch Sieblinien der Ausgangsmischung A_{X1} (vgl. Kap. 6.3.1.1), der zugehörigen Deckschicht im stabilen Zwischenzustand Z_{X1} sowie der maximalen Deckschicht D_{X1} dargestellt.

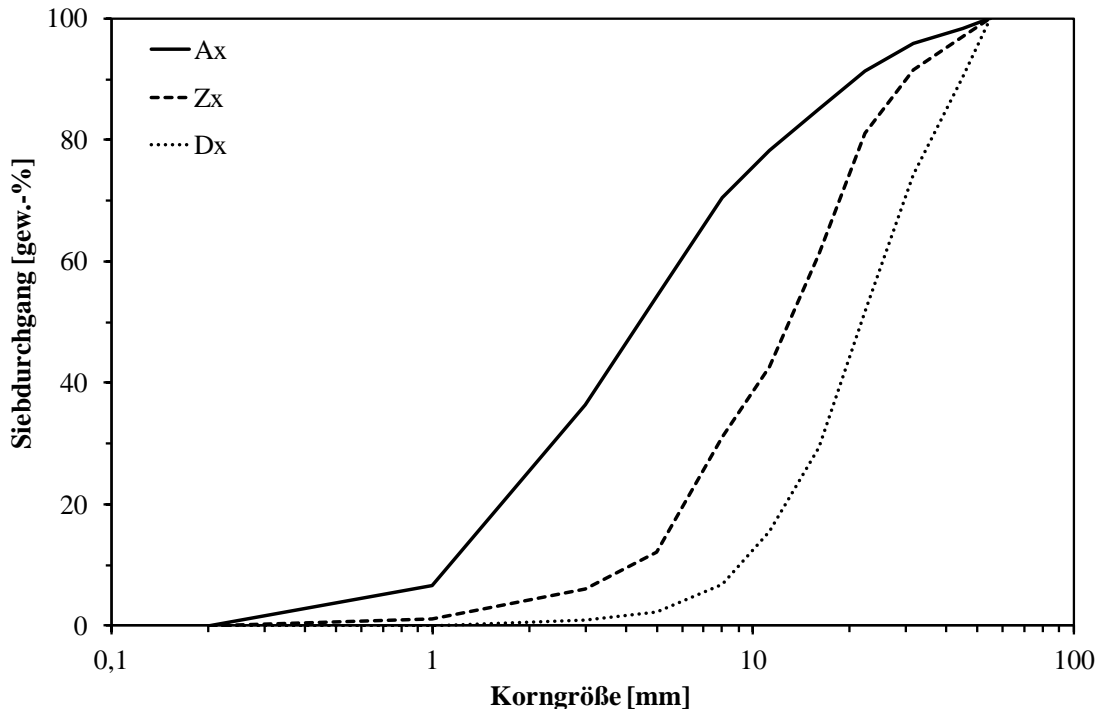


Abb. 2.7: Sieblinien der Ausgangsmischung A_{X1} , der Deckschicht im stabilen Zwischenzustand Z_{X1} sowie der Deckschicht mit maximaler Stabilität D_{X1} .

Zur Berechnung der Stabilität statischer Deckschichten stehen in der Literatur verschiedene gut untersuchte Berechnungsansätze zur Verfügung. In Dittrich (1998) werden Untersuchungen zur Stabilität von Gewässersohlen und die daraus abgeleiteten Formeln ausführlich aufbereitet und entsprechend ihres Anwendungsbereiches zugeordnet (Tab. 2.2). Für die Berechnung der Stabilität von statischen Deckschichten unterscheidet Dittrich (1998) in Ansätze für Deckschichten im stabilen Zwischenzustand (Gessler, 1965; Parker & Klingeman, 1982; Schöberl, 1992b) und für Deckschichten maximaler Sohlenstabilität (Chin, 1985; Günter, 1971; Schöberl 1979, 1992a;). Zusätzlich zu den Ansätzen für Deckschichten enthält die Tabelle auch Ansätze für locker gelagerte Materialien (Meyer-Peter & Müller, 1949, Shields, 1936, Wilcock et al., 1996a, b), die nach Koll (2002) allerdings die Stabilität von statischen Deckschichten in der Regel unterschätzen.

Tab. 2.2: Zuordnung der Berechnungsansätze zur Berechnung der Sohlenstabilität (aus Koll, 2002)

Sohlenstabilität	Ansatz	Autor
keine Deckschicht	<u>Einkornmaterial:</u> $\tau_{0c} = 0,06 \cdot (\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d_{50}$	Shields (1936)
	<u>Kornmischungen:</u> $\tau_{0c} = 0,047 \cdot (\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d_m$	Meyer-Peter & Müller (1949)
	$\tau_{0c} = 0,035 \cdot (\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d_{50}$	Wilcock et al. (1996a, b)
Deckschicht im stabilen Zwischenzustand	$\tau_{0c} = 0,047 \cdot (\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d_{mZ}$	Gessler (1965)
	$\tau_{0c} = \left(\frac{d_{mZ} - d_m}{d_{mD} - d_m} \right)^{2/3} \cdot \tau_{0c_{\max}}$	Schöberl (1992b)
	$\tau_{0c} = 0,035 \cdot (\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d_{50Z}$	Parker & Klingeman (1982)
Deckschicht im Zustand maximaler Stabilität	$\tau_{0c} = \lambda_G \cdot (\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d_{\max}$ mit: $\lambda_G = \left(\frac{d_{mD}}{d_{\max}} \right)^{0,64} \cdot \left(\frac{d_{mA}}{d_{\max}} \right)^{0,33}$	Günter (1971)
	$\tau_{0c_{\max}} = Fr_{*c} \cdot (\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d_{mD}$ mit: $Fr_{*c} = \frac{0,6^2}{a_s \cdot Fr_g^2}$	Schöberl (1979, 1992a)
	$a_s = \left(\frac{d_{90}}{d_{50}} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{d_m}{d_{50}} \right)^{1/2}$	
	$Fr_g^2 = \frac{u_m^2}{(\rho_s / \rho - 1) \cdot g \cdot d_{mD}}$	
	$\tau_{0c} = 0,045 \cdot (\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d_{90}$	Meyer-Peter & Müller (1949)
	$\tau_{0c_{\max}} = Fr_{*c} \cdot (\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d_{50D}$ mit: $d_{50D} = d_{\max} / 1,8$ $Fr_{*c} = 0,05 \cdot \left[0,4 \cdot \left(\frac{d_{50D}}{d_{50}} \right)^{-1/2} + 0,6 \right]^2$	Chin (1985)

Die angeführten Ansätze zur Abschätzung der Stabilität von statischen Deckschichten besitzen nur für Klarwasserabfluss Gültigkeit, d.h. es liegt kein Geschiebetransport vor. In verschiedenen Studien wurde festgestellt, dass durch den Transport von Geschiebe über eine statische Deckschicht eine Remobilisierung von zuvor stabilem Sohlenmaterial verursacht werden kann (z.B. Hassan & Church, 2000; Jackson & Beschta, 1984; Koll, 2002, 2004; Koll et al., 2010; Venditti et al., 2010a, b). Als Auslöser der Erosion werden eine durch den Geschiebetransport verursachte lokale Veränderung der sohlnahen Strömung sowie eine Übergabe des Impulses eines bewegten Kornes bei dem Zusammenstoß mit einem ruhenden Korn genannt. Dabei steigt der Einfluss auf die Stabilität der Deckschicht mit kleiner werdendem Korndurchmesser des transportierten Materials (z.B. Koll, 2002; Koll et al. 2010; Venditti et al., 2010b), d.h. je kleiner das transportierte Korn desto mehr Sohlenmaterial wird transportiert.

2.2.2 Beschreibung der Rauheit von statischen Deckschichten

Ein wesentliches Charakteristikum von Kiessohlen ist die Oberflächenrauheit, die einen direkten Einfluss auf die Hydraulik von Fließgewässern und damit auch auf sämtliche Transportprozesse sowie durch den Einfluss auf die Liftkraft auch auf den Bewegungsbeginn von Sediment hat (vgl. Kap. 2.1.3).

Die Rauheitswirkung von Gewässersohlen können in Energieverluste infolge von Sohlenformen (Formrauheit) und infolge der Energieverluste durch die Partikel bedingte Oberflächenrauheit der Sohle unterschieden werden (z.B. Dittrich, 1998; Griffiths, 1989). Die Größe dieser Verluste hängt laut Schlichting & Gersten (1997) von der Korngröße, der Kornform sowie von der Anordnung auf der Sohlenoberfläche ab.

Ein weit verbreiteter Weg zur Beschreibung der Rauheitswirkung einer Gewässersohle ist die Abschätzung der äquivalenten Sandrauheit k_s anhand eines die Sohle charakterisierenden Korndurchmessers (z.B. d_{50} , d_{84} , d_{90}) oder einem Vielfachen davon. In der Literatur finden sich hierfür zahlreiche empirische Ansätze. In Tab. 2.3 sind exemplarisch einige dieser Ansätze zusammengestellt. Die Vielzahl an unterschiedlichen empirischen Ansätzen für k_s verdeutlicht, dass es schwerfällt, den Widerstand einer Kiessohle lediglich mit nur einem charakteristischen Korndurchmesser zu beschreiben.

Tab. 2.3: Empirische Ansätze zur Abschätzung der äquivalenten Sandrauheit

Autoren		Ansatz
Einstein (1942)		$k_s = d_{65}$
Garbrecht (1961)		$k_s = d_{90}$
Mertens (1997)		$k_s = 2,5 \cdot d_{50}$
Dittrich (1998)	Kies	$k_s = 3,5 \cdot d_m$
	Grobkies, Steine	$k_s = 3,5 \cdot d_{84}$

Diese Vereinfachung ist laut Nikora et al. (1998) und Aberle & Nikora (2006) korrekter Weise nur für eine idealisierte Sohlenoberfläche möglich, die in der Natur nicht auftritt. Sie führten auf der Grundlage von Rinnenversuchen umfangreiche Untersuchungen zur Rauheitswirkung von statischen Deckschichten und zur Möglichkeit der Beschreibung einer Sohlenoberfläche anhand von statistischen Parametern durch. Die Geometrie der Sohlenoberflächen wurde dabei durch hochauflösende Laserscans erfasst. In Aberle et al. 1999 wird empfohlen, anstelle der äquivalenten Sandrauheit die Rauheit durch die Standardabweichung s der Höhenlagen der Sohlenoberfläche zu beschreiben (Gl. 2.17).

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2} . \quad (2.17)$$

Durch diesen Ansatz werden sowohl die Partikel als auch Oberflächenstrukturen rauheitswirksam berücksichtigt. Darin ist z_i der Höhenwert eines Punktes i der Sohle, \bar{z} der Mittelwert der Rauheitserhebungen und n die Anzahl der Messpunkte an denen die Höhenlage der Sohle bestimmt wurde.

3 Transport von externem Geschiebe

Geschiebe ist Sediment, das von der Strömung in Sohlennähe nach Unterstrom transportiert wird. Der Geschiebetransport erfolgt diskontinuierlich. Er setzt sich aus der Mobilisierung einer Anzahl von Körnern, der gleitenden, rollenden oder springenden Fortbewegung und dem Absetzen des Kornes zusammen. Die Abfolge und Dauer der daraus resultierenden Bewegungs- und Ruhephasen einzelner Körner weist eine stochastische Natur auf (z.B. Dancey et al., 2002; Habersack, 2001; Paintal, 1971; Schmidt & Ergenzinger, 1992).

Im Gegensatz zu den in der Realität diskontinuierlichen Transportprozessen wird der Geschiebetransport in der klassischen Betrachtung als ein kontinuierlicher, stationärer Prozess betrachtet, zu dessen Bestimmung in der Literatur verschiedene deterministische und stochastische Ansätze, im Weiteren auch als stationäre Ansätze bezeichnet, zur Verfügung stehen.

Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit ist jedoch der Transport einer limitierten Menge von externem Geschiebe auf einer statischen Deckschicht. Der Geschiebetransport ist also durch die begrenzte Verfügbarkeit ebenfalls limitiert, und es ist von einem stark instationären Transportprozess auszugehen. Der Fokus dieses Kapitels liegt deshalb auf Studien, die sich mit diesen Transportvorgängen auseinandersetzen.

Im Folgenden werden zunächst zum besseren Verständnis der Problematik einige Ansätze für den Gleichgewichtstransport vorgestellt, bevor auf Untersuchungen eingegangen wird, die sich explizit mit der Ausbreitung einer limitierten Geschiebemenge befassen.

3.1 Geschiebetransportformeln für den Gleichgewichtstransport

Die Ansätze zur Berechnung von stationären Geschiebetransport basieren auf der Annahme einer voll bewegten Sohle, die sich im stationären Gleichgewichtstransport befindet, d.h. die Menge, die aus einem Gewässerabschnitt ausgetragen wird entspricht dem Eintrag in diesen Abschnitt von Oberstrom. Die Entwicklung der Transportgleichungen erfolgte anhand von Laborversuchen, in denen ein quasi-stationärer Transport des Sohlenmaterials herrschte. Grundsätzlich lassen sich dabei deterministische und stochastische Ansätze unterscheiden.

3.1.1 Deterministische Ansätze zur Berechnung des Geschiebetransports

Die verbreitetste Geschiebetransportformel für Kiessohlen, die auch heute noch häufig die Grundlage zur numerischen Berechnung von Geschiebetransport bildet (Bui & Rutschmann, 2006, 2009), wurde von Meyer-Peter & Müller (1949) entwickelt:

$$q_b = 8 \cdot \left(\tau_m^* \cdot \left(\frac{k_{St}}{k_r} \right)^{1,5} - \tau_c^* \right)^{1,5} \cdot \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot g \cdot d_m^3} \quad (3.1)$$

q_b ist die volumetrische Geschiebetransportrate [$\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$], τ_m^* wird nach Gl. (2.2) für den mittleren Korndurchmesser (Gl. 2.5) berechnet. Die Rauheit k_{St} folgt aus der Gauckler-Manning-Strickler Gleichung (Gl. 2.10) und k_r wird mit Hilfe von Gl. (2.11) berechnet. Für τ_c^* wird der von Meyer-Peter & Müller (1949) experimentell ermittelte Wert von 0,047 verwendet.

Die Transportformel wurde anhand von Untersuchungen mit verschiedenen Einkornmaterialien mit einer Dichte von 1250 bis 4200 kg/m^3 und für Kiesmischungen mit einer Dichte von 2650 kg/m^3 für einen Gefällebereich von 0,04 bis 2 % hergeleitet. Die Untersuchten Materialien wiesen Korndurchmesser von 0,04 bis 30 mm auf. Bis heute wird der Ansatz von Meyer-Peter & Müller (1949) auch noch in neueren Untersuchungen verbessert bzw. für einen breiteren Anwendungsbereich erweitert (z.B. Huang, 2010; Rickenmann, 1990; Hunziker, 1995, Hunziker & Jäggi, 2002; Smart & Jäggi, 1983; Wong & Parker, 2006). Die Erweiterungen der Transportgleichung betreffen beispielsweise die Anwendung auf große Sohlenneigungen bis 20 % (Smart & Jäggi, 1983), die Berücksichtigung von Schwebstofftransport (Rickenmann, 1990) und die Berechnung von fraktionsweisem Geschiebetransport (Hunziker 1995). Der Vorfaktor 8 in der Gleichung wurde von Hunziker & Jäggi (2002) und Wong & Parker (2006) basierend auf Re-Analysen der Versuchsdaten von Meyer-Peter & Müller (1949) auf den Faktor 5 korrigiert.

Wilcock & Crowe (2003) entwickelten einen auf der Arbeit von Parker (1990) aufbauenden, sohlenoberflächenbasierten Transportansatz für mobile Deckschichten, der unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit einzelner Korngrößen und dem Einfluss der Exponiertheit (vgl. Kap. 2.1.2) den fraktionsweisen Gleichgewichtstransport beschreibt (Gl. 3.2). Der Ansatz berücksichtigt dabei nur den Kornanteil der verschiedenen Fraktionen an der Sohlenoberfläche, das Unterschichtmaterial wird nicht mit einbezogen. Der Geschiebetransport wird für jede Fraktion wie folgt als dimensionslose Transportrate W_i^* berechnet:

$$W_i^* = \begin{cases} 0,002 \cdot \phi^{7,5} & \text{für } \phi < 1,35 \\ 14 \cdot \left(1 - \frac{0,894}{\phi^{0,5}} \right) & \text{für } \phi \geq 1,35 \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\text{mit: } \phi = \frac{\tau_0}{\tau_{ri}} \quad (3.2b)$$

τ_0 ist die Sohlenschubspannung und τ_{ri} ist die über Funktionen zur Berücksichtigung des relativen Herausragens korrigierte kritische Schubspannung der betrachteten Fraktion. Mit der Beziehung in Gl. (2.14) können die dimensionslosen Transportraten in volumenbezogene Transportraten $q_{B,i}$ umgerechnet werden.

Der Anwendungsbereich der Formel von Meyer-Peter & Müller (1949) sowie des Ansatzes von Wilcock & Crowe (2003) bezieht sich, entsprechend der Randbedingungen der Untersuchungen, auf einen kontinuierlichen Gleichgewichtstransport, d.h. der Geschiebeeintrag in einen Gewässerabschnitt ist gleich dem Geschiebeaustrag. Weiterhin beziehen sich die Ansätze auf den Transport von Sohlenmaterial, dass in dem betrachteten Fließabschnitt aus der Sohle heraus mobilisiert wurde, und nicht auf den Transport über eine Sohle hinweg, die stabil bleibt und damit nicht am Transportgeschehen beteiligt ist.

3.1.2 Stochastisches Transportmodell nach Einstein

Einstein (1936, 1950) betrachtet den Transport von Geschiebe als ein Wahrscheinlichkeitsproblem. Die Beschreibung des Transports setzt sich im Wesentlichen aus der Wahrscheinlichkeit, dass Sohlenbestandteile in Bewegung geraten, und der Wahrscheinlichkeit, dass sich Partikel wieder auf der Sohle ablagern, zusammen. Hierbei nimmt Einstein (1936, 1950) an, dass die Wahrscheinlichkeit, dass ein Korn der Sohle durch die Strömung bewegt wird, von seiner Größe, seiner Form, seinem Gewicht und vom Strömungsvorgang in Sohlennähe abhängt. Weiterhin legt er zugrunde, dass die Mobilisierung eintritt, wenn der augenblickliche hydrodynamische Auftrieb größer ist als seine Gewichtskraft. Die durchschnittliche Entfernung, die ein Geschiebeteilchen mit dem Korndurchmesser d vor seiner erneuten Ablagerung zurücklegt, ist nach Einstein (1950) unabhängig von den Strömungsbedingungen und kann als annähernd konstant zu $A_L d = \lambda d$ mit $\lambda = 100$, also dem 100-fachen des Korndurchmessers, angenommen werden (Promny, 2008a). Die Wahrscheinlichkeit der Wiederablagerung eines mobilisierten Korns ist an allen Punkten der Sohle, an denen die Strömungskräfte das Teilchen nicht unmittelbar wieder abtransportieren würden, gleich und findet auf der Strecke $A_L d$ statt. Als Grundlage für die Entwicklung des stochastischen Transportansatzes dienten die gleichen Versuchsdaten, die Meyer-Peter & Müller (1949) für die Ableitung ihrer Transportformel nutzten.

Der von Einstein (1950) formulierte Ansatz beschreibt, wie die im vorangehenden Abschnitt erläuterten Formeln, ebenfalls den stationären Gleichgewichtstransport. Ein erodiertes Korn wird also durch ein ähnliches, sich ablagerndes Korn ersetzt, so dass sich die Sohle statistisch gesehen im Gleichgewicht befindet. Für die Herleitung seiner Transportgleichung setzte Ein-

stein (1950) also die Anzahl der erodierten Körner n_{ero} mit der Anzahl der deponierten Körner n_{dep} gleich (Gl. 3.3).

$$\underbrace{\frac{i_B \cdot q_B}{\rho_s \cdot A_2 \cdot A_L \cdot d^4}}_{n_{ero}} = \underbrace{\frac{i_b \cdot P}{A_1 \cdot A_3 \cdot d^2} \cdot \sqrt{\frac{g \cdot (\rho_s - \rho)}{d \cdot \rho}}}_{n_{dep}}. \quad (3.3)$$

Hierbei ist i_B der Anteil der Kornfraktion mit dem Durchmesser d an dem transportierten Geschiebe, i_b der Anteil an dem Sohlenmaterial, q_B die volumetrische Geschiebetransportrate, und P die Erosionswahrscheinlichkeit des Korns pro Sekunde. A_1 und A_2 sind Koeffizienten, die sich auf die Form der Körner beziehen, A_3 ist ein Koeffizient, bezogen auf die benötigte Zeit zur Mobilisierung eines Korns, und A_L beschreibt die durchschnittliche Schrittweite eines Korns.

Unter Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeit eines Korns, vor der Wiederablagerung eine oder mehrere Schrittweiten der Länge λd zurückzulegen, und des Bewegungsbeginns, der durch das Verhältnis der Gewichtskraft des Korns unter Auftrieb zu der Liftkraft ($F'_G/F_L < 1$) definiert wird, formuliert Einstein (1950) seine Transportbeziehung wie folgt:

$$P = 1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-B_* \cdot \psi^{-1/\eta}}^{B_* \cdot \psi^{-1/\eta}} e^{-t^2} dt = \frac{A_* \cdot \phi}{1 + A_* \cdot \phi}. \quad (3.4)$$

Mit:

$$A^* = 43,5 = const.$$

$$B^* = 0,143 = const.$$

$$\eta = 0,5 = const.$$

$$\text{Transportintensität:} \quad \phi = \frac{q_B}{\rho_s \cdot g} \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_s - \rho} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{1}{g \cdot d^3} \right)^{1/2} \quad (3.4a)$$

$$\text{Bewegungsintensität:} \quad \psi = \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) \cdot \frac{d_{35}}{R'_s \cdot I_E} \quad (3.4b)$$

Die Transportintensität ϕ beschreibt die Wahrscheinlichkeit mit der die Körner in einer Zeiteinheit aus einer Flächeneinheit der Sohle mobilisiert werden. Die Bewegungsintensität ψ ist eine Funktion des Verhältnisses der Strömungskraft und des Widerstands eines Korns gegen die Bewegung. Sie beschreibt die Anzahl der Körner, die sich je Zeit- und Flächeneinheit auf der Sohle ablagern. R'_s ist darin der auf die Sohle bezogene Anteil des hydraulischen Radius.

Durch eine Erweiterung der Gleichungen für die Transportintensität ϕ und die Bewegungsintensität ψ mit entsprechenden Korrekturfunktionen kann der Einfluss des relativen Herausragens (vgl. Abschnitt 2.1.2) in dem Ansatz von Einstein (1950) berücksichtigt werden.

Der Ansatz von Einstein wurde in einer Vielzahl weiterführender Untersuchungen aufgegriffen und weiterentwickelt (z.B. Misri et al., 1984, Pyrcce & Ashmore, 2003; Sun & Donahue, 2000; Turowski, 2010; Wang et al., 2008; Yalin, 1977). Es wurde unter anderem festgestellt, dass die Annahmen bezüglich der Einzelschrittweiten und des Bewegungsbeginns eine zu starke Vereinfachung darstellen (Wang et al., 2008). Abweichend von dem Ansatz von Einstein wird beispielsweise von Wang et al. (2008) und Yalin (1977) vorgeschlagen, anstelle eines konstanten Wertes für den Koeffizienten λ der Einzelschrittlänge $A_L d$ eine Funktion einzusetzen, die umgekehrt proportional zu ψ ist.

Phillips & Sutherland (1989) erweiterten den Wahrscheinlichkeitsansatz dahingehend, dass trotz stationärem Abfluss ein Geschiebetransport im Ungleichgewicht berechnet werden kann. Als Grundlage dienten hierfür Versuche in einer Laborrinne mit Sand ($d = 1,8 \text{ mm}$). Es wurde untersucht, wie sich die Sohle verändert, wenn die voll bewegliche Sohle erodiert, ohne dass eine Geschiebezugabe von Oberstrom erfolgte. Das Ungleichgewicht war also eine Folge dessen, dass der Klarwasserabfluss auf eine erosionsfähige Sohle traf und dort die Menge an Geschiebe aufnehmen konnte, die unter den lokalen Strömungsverhältnissen transportiert werden konnte. Das Ungleichgewicht wird also nicht durch eine Limitierung der Geschiebemenge, sondern durch eine ungleichmäßige Erosion der Sohle verursacht und kann daher mit Kolkungsvorgängen verglichen werden, wie sie z.B. in Flusskrümmungen auftreten.

3.2 Ausbreitung einer limitierten externen Geschiebemenge

Die Ausbreitung einer limitierten Geschiebemenge stellt einen Transportvorgang dar, der durch die Menge an zugegebenem Material begrenzt wird. Die Transportvorgänge sind also hochgradig instationär, so dass die herkömmlichen Transportansätze, die für den stationären Gleichgewichtstransport entwickelt wurden, nicht anwendbar sind. Weiterhin geben diese Gleichungen keinerlei Aufschluss über die Transportweiten, die Transportgeschwindigkeit oder die Verteilung des deponierten Sediments. Bereits in der Vergangenheit wurden sowohl Feldversuche (z.B. Faulhaber & Riehl, 2001; Ferguson & Wathen, 1998; Ferguson & Hoey, 2002; Ferguson et al., 2002; Götz & Trompeter, 2001) als auch Laborversuche (z.B. Cui et al., 2003a, b; Lisle et al., 1997, 2001; Promny, 2008a, b; Sklar et al., 2009; Wong et al., 2007) durchgeführt, um die Vorgänge bei Geschiebetransport im Ungleichgewicht zu untersuchen.

Im Gegensatz zu dem Gleichgewichtsgeschiebetransport, bei dem im Mittel eine über die Zeit konstante Transportrate vorliegt, liegt bei dem Abtransport einer limitierten Geschiebemenge ein Ausbreitungsvorgang vor, bei dem sich das Material über die stromabwärts liegende Sohle verteilt. Für die Beschreibung der Geschiebeausbreitung ist es von Interesse, wie weit das Geschiebe transportiert wird und in welchem Zeitraum dies geschieht. Im Nachfolgenden wird zunächst allgemein auf den Transportprozess eingegangen, bevor das vorhandene Wissen vorgestellt wird.

3.2.1 Advektion und Dispersion

Der Transportvorgang einer begrenzten Geschiebemenge wird häufig mit den Begriffen Advektion bzw. Translation und der Dispersion beschrieben (z.B. Cui et al., 2003a, b; Lisle et al., 2001, Promny, 2008a; Sklar et al., 2009). Advektion beschreibt den Transport durch eine treibende Kraft in die gleiche Richtung dieser Kraft (Promny, 2008a). Bei einer reinen Advektion ändert sich nicht die Verteilung der transportierten Partikelmenge (vgl. Abb. 3.1a). Der Begriff Translation wird vor allem in der englischsprachigen Literatur häufig analog verwendet. In dieser Arbeit werden die Begriffe so verstanden, dass bei einer reinen Advektion die statistische Verteilung der transportierten Partikel zwar konstant bleibt, sich die Position der einzelnen Partikel innerhalb dieser Verteilung jedoch geändert haben kann. Translation beschreibt einen Sonderfall der Advektion, bei dem eine Parallelverschiebung der gesamten Partikelmenge stattfindet, ohne dass sich die Position der einzelnen Partikel innerhalb der Verteilung verändert. Bei dem strömungsinduzierten Transport eines Kiesdepots auf einer rauen Sohle sind allerdings die oben liegenden Körner bis zu ihrem Abtransport dem Strömungsangriff stärker ausgesetzt als die tiefer liegenden Körner. Der translative Transport einer frei beweglichen Partikelmenge ist deshalb in der Praxis nicht möglich und es wird im Folgenden nur noch der Begriff Advektion verwendet.

Die Dispersion (Abb. 3.1b) ist wesentlicher Bestandteil des Transports von Geschiebe (Haschenburger, 2011; Humphries, 2012; Nikora et al., 2002,). Sie beschreibt die Streuung der Transportweiten und führt zu einer weiteren Verteilung einer Partikelmenge infolge von zufälligen Einflüssen aus Turbulenz, Kornform sowie aus Topographie und Rauheit der Sohle. Bei der reinen Dispersion nimmt die Ausdehnung der Verteilung mit dem Transport zu, das Maximum der Verteilung verbleibt jedoch zu jedem Zeitpunkt auf der Ausgangsposition (Lisle et al., 1997; Promny, 2008a; Sklar et al., 2009). Auch dieser Fall ist in der Praxis sehr unwahrscheinlich. In der Regel erfolgt der Transport einer Menge frei beweglicher Partikel als Kombination der beiden Transportvorgänge (Ganti et al., 2010), Abb. 3.1c.

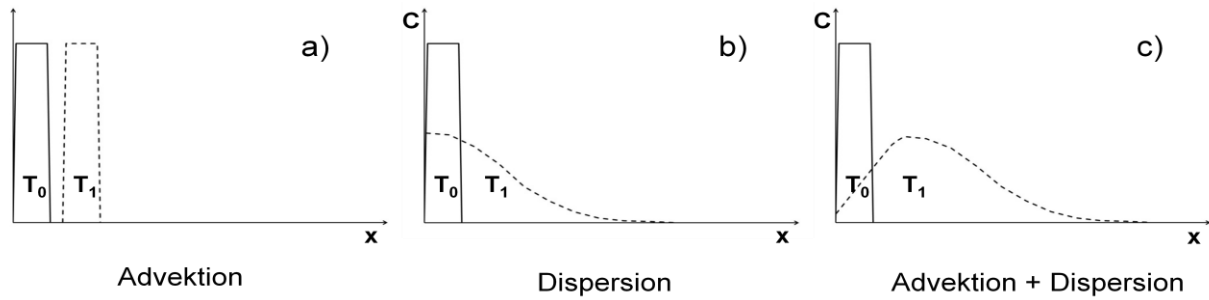


Abb. 3.1: Advektion und Dispersion

Das Maximum der Verteilung wandert nach Unterstrom und gleichzeitig nimmt die Weite der Verteilung mit der Transportweite der Partikel zu. Eine allgemeine Schreibweise für den Transport infolge von Advektion und Dispersion liefert die allgemeine 1D-Transportgleichung:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \underbrace{\left(-u \frac{\partial C}{\partial x} \right)}_{\text{Advektion}} + \underbrace{\left(\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \right)}_{\text{Dispersion}} \quad (3.5)$$

Hierbei ist u die Fließgeschwindigkeit in Hauptfließrichtung x , C die Stoffkonzentration und D der Dispersionskoeffizient, der den Grad der Zunahme der Dispersion beschreibt.

3.2.2 Untersuchungen zur Ausbreitung von Geschiebe

Die meisten Untersuchungen zur Ausbreitung eines mengenmäßig limitierten Geschiebedepots befassen sich mit Systemen, in denen bereits vor der Zugabe von zusätzlichem Geschiebe das vorhandene Sohlenmaterial transportiert wurde (Cui et al., 2003a, b; Faulhaber & Riehl 2001; Ferguson et al. 2002; Götz & Trompeter, 2001; Lisle et al., 1997, 2001). In den Versuchen wurde also sowohl das Sohlenmaterial als auch das externe Geschiebe transportiert. Im Folgenden werden die für diese Arbeit relevanten Studien aus der Literatur vorgestellt.

3.2.2.1 Laborversuche zur Ausbreitung von externem Geschiebe mit bewegter Sohle

LISLE ET AL. (1997, 2001) führte Versuche in einer 4 m breiten und 160 m langen Versuchsrinne durch. Als Sohlensediment wurde ein Sand- Feinkiesgemisch mit einem d_{50} von 0,57 mm verwendet. Vor Zugabe des externen Geschiebes, das dem Sohlenmaterial entsprach, wurde ein mobiles Gleichgewicht mit Geschiebezirkulation eingestellt. Die Abwärtsbewegung des Sediments erfolgte dabei in Form von alternierenden Bänken. Nach Herstellung des Gleichgewichtstransports wurde auf einer Länge von 20 m eine Menge von 800 kg externen Geschiebes mit einer Höhe von 0,04 m eingebaut und unter den hydraulischen Randbedingungen des Gleichgewichtstransports nach Unterstrom transportiert. Lisle et al. (1997, 2001)

stellten fest, dass bei dem Transport des zugegebenen Materials die Dispersion deutlich dominierte und dass nahezu kein Transport in Form von Advektion erfolgte. Bei der Entwicklung ihres Berechnungsansatzes für die zeitliche Entwicklung der Geschiebewelle gehen Lisle et al. (1997) von einer sehr großen externen Geschiebemenge aus, die als eine sich abflachende Welle transportiert wird und einen geschlossenen Teppich mit einer messbaren Höhe bildet. Zur Berechnung der Höhenentwicklung dieser Geschiebewelle wird eine abgewandelte Form der Transportgleichung von Meyer-Peter & Müller (1949) vorgeschlagen:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{K \cdot q_B \cdot I^{1/2}}{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot (1 - p) Fr_0} \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \quad (3.6)$$

Hierbei ist n die auf das Bezugsniveau bezogene Höhe der Geschiebewelle am Ort x , t ist die Zeit nach der Zugabe des Geschiebes, q_B ist die volumetrische Geschiebetransportrate und I ist das mittlere Sohlengefälle vor der Geschiebezugabe. K ist die empirische Konstante in der Transportformel von Meyer-Peter & Müller (1949) und p ist der Porenanteil der Sohle. H ist die Gesamtenergiehöhe des Fluids:

$$H = z + h + \frac{u^2}{2 \cdot g} \quad (3.7)$$

Darin ist z die Höhenlage der Sohle, bezogen auf das Bezugsniveau, h die Fließtiefe und u die Fließgeschwindigkeit. Die Froudezahl Fr_0 bezieht sich auf die Strömung vor der Zugabe des externen Materials und berechnet sich zu:

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (3.8)$$

CUI ET AL. (2003a, b) führten Laborversuche in einer 40 m langen und 0,5 m breiten Versuchsrinne durch. Nachdem das Sohlensediment mit einem Durchmesser von 2-8 mm eingebaut wurde, wurde in Rezirkulationsversuchen ein mobiles Gleichgewicht mit einem mittleren Sohlengefälle von $I = 0,0108$ hergestellt. Auf die erhaltende Sohle wurde das externe Material auf einer Länge von 0,5 m mit einer Höhe von 0,04 m eingebaut und unter den hydraulischen Randbedingungen des Gleichgewichtstransport und mit Geschieberezirkulation transportiert. Es wurden hierfür drei verschiedene Kiesmischungen verwendet. Das erste Zugabematerial entsprach dem rezirkulierten Geschiebe, das zweite dem ursprünglichen Sohlenmaterial vor der hydraulischen Belastung und das dritte war deutlich feiner als das Sohlenmaterial. In Übereinstimmung mit Lisle et al. (1997, 2001) wurde grundsätzlich festgestellt, dass der Transport infolge von Dispersion dominiert und die Advektion vernachlässigbar ist. Eine

Ausnahme bildete der Versuch mit dem feinen Zugabematerial, bei dem ein signifikanter advektiver Transport beobachtet wurde. Unter der Annahme, dass auch während des Transports des zusätzlichen Geschiebes quasi-stationäre Gleichgewichtszustände herrschen, leiteten Cui et al. 2003b aus der u. a. in Parker et al. (2000) und Tsujimoto (1978) gegebenen Exner Gleichung folgende stark vereinfachte numerische Lösung zur Berechnung der Höhenentwicklung der Geschiebewelle ab:

$$g \cdot h \cdot \frac{\partial n}{\partial x} + u_*^2 = 0 \quad (3.9)$$

Darin ist h die Fließtiefe, n die Höhe der Sohle, x die Laufvariable in Fließrichtung und $u_* = (g \cdot h \cdot I)^{1/2}$ die Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit. Wie bereits bei Lisle et al. 2001 wird von einer Geschiebewelle mit einer messbaren Höhe ausgegangen. Der Transport des externen Materials gilt als abgeschlossen, sobald kein Höhenunterschied mehr zur umgebenen Sohle festgestellt werden kann.

WONG ET AL. 2007 führten Laborversuche zur Transportgeschwindigkeit von Geschiebetracer bei stationär gleichförmigem Gleichgewichtstransport mit ebener Sohle durch. Das Sohlenmaterial wies, ebenso wie der farbig gekennzeichnete Tracer, ein d_{50} von 7,1 mm bei einer geometrischen Standardabweichung von $\sigma_G = 1,2$ und einer Dichte von $\rho_s = 2550 \text{ kg/m}^3$ auf. In der 27,5 m langen und 0,5 m breiten Versuchsrinne wurde eine locker gelagerte Kiessohle eingebaut und nach Einstellen des Versuchsdurchflusses ein Gleichgewichtstransport mit Geschieberezirkulation hergestellt. Nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes wurde der Versuch unterbrochen und ein Teil der Versuchssohle durch den Tracer ersetzt. Für die Tracermenge ist für jeden Versuch eine Anzahl von jeweils 3200 Tracerkörnern angegeben. Insgesamt wurden elf Versuchsdurchläufe dokumentiert, in denen die dimensionslose Schubspannung τ^* im Bereich von $\tau^* = 0,0758$ bis 0,1193 variiert wurde. Die Versuchsdauer, nach der die Verteilung der Tracerpartikel ermittelt wurde, variierte zwischen 90 und 360 min. In allen Versuchen erfolgte der Transport bei ebener Sohle.

Wong et al. (2007) leiteten aus ihren Versuchen eine Formel zur Berechnung der mittleren dimensionslosen Tracergeschwindigkeit u_G^* (Gl. 3.12) ab, die, resultierend aus der in jedem Versuch identischen Tracergröße, lediglich eine Funktion der dimensionslosen Sohlenschubspannung τ^* ist:

$$u_G^* = 1,67 \cdot (\tau^* - \tau_c^*)^{0,9} \quad (3.11)$$

Die dimensionslose Tracergeschwindigkeit definieren Wong et al. (2007) zu:

$$u_G^* = \frac{u_T}{\sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot g \cdot d_T}}, \quad (3.12)$$

wobei u_T die dimensionsbehaftete mittlere Geschwindigkeit des Tracers mit der Korngröße d_T ist. Der kritische Shields-Parameter wurde von Wong et al. (2007) experimentell zu $\tau_c^* = 0,0549$ bestimmt.

PROMNY (2008a, b) untersuchte die Transportgeschwindigkeit und die Dispersion von Sohlenmaterial in einer 20 m langen und 1 m breiten Laborinne. Der Versuchsaufbau bestand aus einer beweglichen Sohle aus locker gelagertem Material, das mit einem Korndurchmesser von 1 bis 8 mm eine enge Sieblinie aufwies. Auf diese Sohle wurde eine Tracerbarre, die aus eingefärbtem Sediment mit der mittleren Korngröße des Sohlenmaterials bestand, platziert. Die Tracerbarre ging über die gesamte Rinnenbreite und hatte eine Länge von 20 cm und eine Höhe von 2 cm. Promny (2008a, b) führte seine Versuche zur Untersuchung des Einflusses der Kornform mit zwei unterschiedlichen Materialien durch. Dies war zum einen natürlicher, gerundeter Kies aus dem Rhein und zum anderen scharfkantiger Quarzporphyr. Beide Materialien wiesen die gleiche Dichte und Sieblinie mit $d_{50} = 3$ mm auf. Weiterhin wurde zwischen Transport bei ebener Sohle und Transport unter der Bildung von Dünen unterschieden. Hierzu wurden jeweils zwei verschiedene Abflüsse eingestellt. In beiden Fällen wurde sowohl das Sohlenmaterial als auch der Tracer bewegt. Die Versuche wurden ohne Geschiebezirkulation oder kontinuierliche Geschiebezugabe durchgeführt, so dass nach Versuchsbeginn eine Tiefenerosion der Sohle einsetzte. Tab. 3.1 fasst die Parameter für die Versuche zusammen.

Tab. 3.1: Parameter der Versuche von Promny (2008a, b)

Material	Sohlenform	ρ_s [kg/m³]	τ_c^* [-]	q [m³/(s·m)]	h [m]	I_E [-]	τ^* [-]
Rheinkies	ebenen	2600	0,055	0,30	0,35	0,0010	0,007
Quarzporphyr			0,065				
Rheinkies	Dünen		0,055	0,45	0,43	0,0013	0,11
Quarzporphyr			0,065				

Zur Messung des Transportfortschrittes wurden die Versuche unterbrochen und die Verteilung des farbigen Tracers anhand von Sohlenfotos auswertet. Promny (2008a, b) folgte aus seinen Versuchsergebnissen, dass der Transport der Tracerbarre als eine Kombinati-

on aus Advektion und Dispersion erfolgte. Er unterschied bei seinen Untersuchungen in die Transportweite der Tracerfront L_F und die mittlere (advektive) Transportweite L_S die anhand der Position des Schwerpunkts der Tracerverteilung ermittelt wurde. Als Position der Tracerfront definierte Promny (2008a) den Punkt, den 99 % der Tracer noch nicht überschritten hatten. Aus den Transportweiten wurden die Transportgeschwindigkeiten ermittelt. Es zeigte sich, dass der Tracer bei Dünenbildung schneller transportiert wurde als bei ebener Sohle. Weiterhin wurde der abgerundete Rheinkies schneller bewegt als der scharfkantige Quarzporphyr. Die Transportgeschwindigkeit nahm mit der Versuchsdauer t ab. Promny (2008a) führte letzteres auf eine vertikale Durchmischung des Tracers mit dem Sohlenmaterial zurück. Tab. 3.2 fasst die zu Versuchsbeginn und zu Versuchsende ermittelten mittleren Transportgeschwindigkeiten u_T zusammen.

Tab. 3.2: Mittlere Transportgeschwindigkeiten zu Versuchsbeginn und zu Versuchsende (Promny, 2008b)

Sohlenform	Material	t [min]	U_T [m/h]
eben	Rheinkies	15	2,2
		630	1,3
	Quarzporphyr	15	1,7
		720	1,2
Dünen	Rheinkies	10	8,3
		180	4,2
	Quarzporphyr	10	9,6
		180	3,9

Promny (2008) nutzte die Versuchsdaten zur Überprüfung der Anwendbarkeit eines auf die Arbeit von Einstein (1950) aufbauenden stochastischen Modells für den Geschiebetransport. Er kam zu dem Schluss, dass nach entsprechender Kalibrierung sowohl Advektion als auch Dispersion durch ein stochastisches Modell wiedergegeben werden kann.

3.2.2.2 Naturversuche zur Ausbreitung von externem Geschiebe bei bewegter Sohle

GÖLZ & TROMPETER (2001) untersuchten in Feldversuchen das Transportverhalten von Geschiebe im Oberrhein unterstrom der Staustufe Iffezheim, einem aufgrund von Geschiebedefizit durch Erosion gekennzeichneten Bereich in den bereits seit 1978 Geschiebe zum Ausgleich dieses Defizits zugegeben wird. Im Oktober 1996 wurden auf einer Länge von 900 m insgesamt 28.000 t Granitschotter mit einer Korngröße von 4 bis 63 mm als Tracer in den

Rhein eingebracht. Götz & Trompeter (2001) bestimmten über einen Zeitraum von drei Jahren die Längsverteilung des Tracers. Dies erfolgte 2, 6, 12, 24 und 36 Monate nach der Zugabe. Abb. 3.2 zeigt die zeitliche Veränderung der Längsverteilung der Tracer am Beispiel der Kornfraktion 16 bis 31,5 mm.

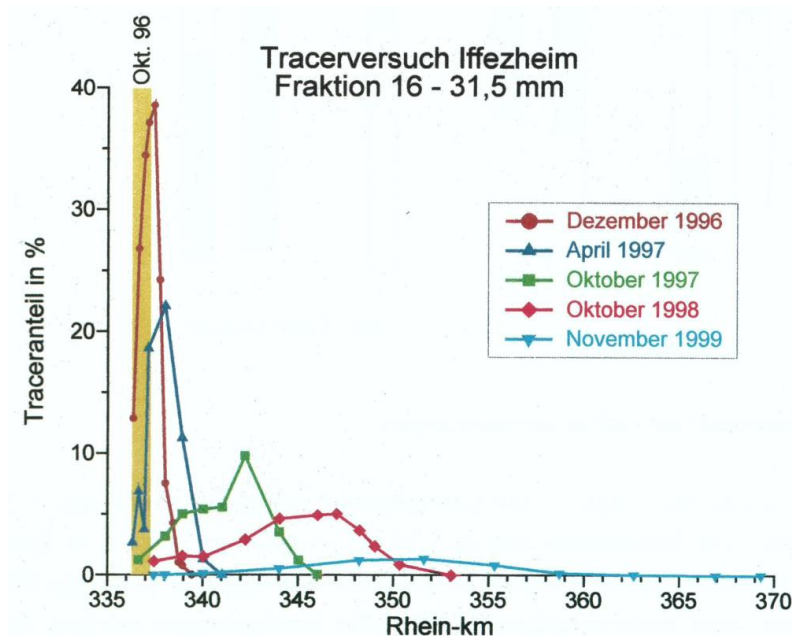


Abb. 3.2: Zeitliche Entwicklung der Tracerverteilung im Feldversuch am Rhein bei Iffezheim (aus Götz und Trompeter, 2001)

Die Tracerverteilung flacht mit der Zeit ab, d. h., sie wird weiter. Gleichzeitig wandert das Maximum der Verteilung mit der Zeit nach Unterstrom. Der Transport erfolgt also sowohl advektiv als auch dispersiv. Götz & Trompeter (2001) folgern aus ihren Untersuchungen, dass die Dispersion vor allem durch die vertikale Einmischung der Tracer in die Gewässersohle verursacht wird. Durch Gefrierkernbohrungen konnten noch bis zu einer Tiefe von 1,3 m unterhalb der Sohlenoberfläche einzelne Tracer nachgewiesen werden. Aus den gemessenen Verteilungen wurden jeweils die Positionen der Tracerfront und des Schwerpunkts der Verteilungen bestimmt. Die Transportweite des Schwerpunkts wird dabei als mittlere Transportweite gewertet. Aus den Diagrammen in Abb. 3.3 wird ersichtlich, dass die größeren Fraktionen mit einem Durchmesser von 33 bis 45 mm, bzw. 45 bis 63 mm deutlich langsamer transportiert werden als die kleineren Fraktionen (4 bis 8 mm, 8 bis 16 mm, 16 bis 33 mm), die untereinander annähernd die gleiche Transportgeschwindigkeit aufweisen. Weiterhin ist zu erkennen, dass unabhängig von der Korngröße und der Versuchszeit die Fronten mit Tracergeschwindigkeiten von 4,5 bis 11 km/a etwa doppelt so schnell voranschreiten wie die Schwerpunkte der Verteilungen.

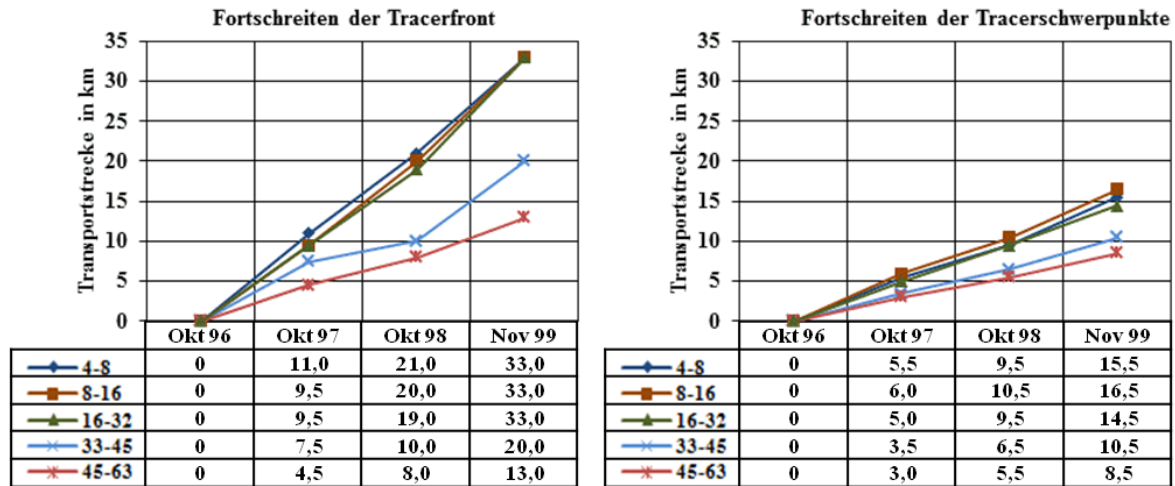


Abb. 3.3: Fortschreiten von Tracerfront und -schwerpunkt im Feldversuch am Rhein bei Iffezheim (aus Gölz und Trompeter, 2001)

Das Verhältnis der Transportweite der Tracerfront L_F zu der Transportweite des Tracerschwerpunkts L_S interpretieren Gölz und Trompeter (2001) als Maß für die Zunahme der Dispersion der Tracer. Der konstante Wert für das Verhältnis L_F/L_S bedeutet, dass die Dispersion des Tracers mit der Zeit zunimmt.

FAULHABER & RIEHL (2001) führten in der Erosionsstrecke der Elbe bei Torgau ebenfalls Feldversuche zum Transport von Geschiebe durch. Als Geschiebetracer wurden zum einen petrografische Tracer (Meißner Granit) und zum anderen sog. Luminofores-Tracer (Sohlen-sediment, das mit einer unter ultraviolettem Licht sichtbaren Farbe behandelt wurde) verwendet. Bei den Zugabeversuchen wurde in drei Kornfraktionen unterschieden: Feinkies mit $d = 2$ bis $6,3$ mm, Mittelkies mit $d = 6,3$ bis 20 mm und Grobkies mit $d = 20$ bis 63 mm. Als Indikator für die Transportgeschwindigkeit wurden die Geschwindigkeiten der Tracerfronten bestimmt. Die Autoren berichten von zwei Tracerversuchen, die im Jahr 1996 und im Jahr 1997 begannen. In dem 1996 begonnenen Versuch wurden die Positionen der Tracerfronten für die einzelnen Kiesfraktionen jeweils 141 und 327 Tage nach der Zugabe gemessen. Die Ergebnisse sind in Tab. 3.3 zusammengestellt. In dem 1997 gestarteten Versuch wurden die Messungen der Tracerfronten 182, 357 und 777 Tagen nach der Zugabe vorgenommen (vgl. Tab. 3.4).

Tab. 3.3: Geschwindigkeiten der Tracerfront, Naturversuch Elbe 1996 (aus Faulhaber & Riehl, 2001)

Transportdauer [d]	Feinkies (2-6,3 mm)	Mittelkies (6,3-20 mm)	Grobkies (20-63 mm)
141	64 m/d	40 m/d	20 m/d
327	-	22 m/d	13 m/d

Tab. 3.4: Geschwindigkeiten der Tracerfront, Naturversuch Elbe 1997 (aus Faulhaber & Riehl, 2001)

Transportdauer [d]	Feinkies (2-6,3 mm)	Mittelkies (6,3-20 mm)	Grobkies (20-63 mm)
182	47 m/d	47 m/d	42 m/d
357	32 m/d	32 m/d	21 m/d
777	24	24 m/d	13 m/d

Die Versuchsergebnisse aus dem Jahr 1996 zeigen, dass die kleineren Korngrößen schneller transportiert wurden als die größeren. Weiterhin nahm die Transportgeschwindigkeit mit zunehmender Versuchsdauer ab. Auch in den Versuchen aus dem Jahr 1997 geht hervor, dass die Transportgeschwindigkeit mit der Zeit abnimmt. Die Transportgeschwindigkeit war in diesem Versuch für den Fein- und Mittelkies gleich groß. Der Grobkies bewegte sich langsamer als die beiden kleineren Fraktionen. Dieses Verhalten wurde auch in den Tracerversuchen von Götz & Trompeter (2001) beobachtet. Die Verlangsamung des Tracers mit der Zeit führen Faulhaber & Riehl (2001) auf eine mit der Zeit zunehmende vertikale Dispersion zurück. Unter vertikaler Dispersion wird dabei die Einmischung von Tracer in tiefere Sohlenschichten verstanden (Haschenburger, 2011). Dies führt einerseits dazu, dass Tracer nicht wieder aufgefunden und damit nicht in den Messungen erfasst werden können, und andererseits dazu, dass eingebaute Tracer nur noch dann bewegt werden, wenn ein Abflussereignis hoch genug ist, um die Sohle bis in die entsprechende Tiefe zu mobilisieren.

In FERGUSON & WATHEN (1998), Ferguson & Hoey (2002) und Ferguson et al. (2002) werden Tracerversuche vorgestellt, die in den Jahren 1991 bis 1999 im Allt Dubhaig, einem kleinen Fluss im schottischen Hochland, durchgeführt wurden. Das Gefälle des Allt Dubhaig nimmt auf einer Fließstrecke von nur 3,5 km von 1,7 % auf 0,3% ab und weist eine ebenso schnell abnehmende Korngröße des Sohlenmaterials auf. Im Jahr 1991 wurden an sechs ausgewählten Querprofilen insgesamt mehr als 1400 Tracerkörner mit Korngrößen von 16-256 mm eingebaut, von denen 1220 Stück mit Magneten versehen waren. In Tab. 3.5 sind die Charakteristika der ausgewählten Zugabestellen zusammengefasst. Die Kornverteilung des Tracers wurde

jeweils an die lokale Kornverteilung der Sohlenoberfläche angepasst und entsprach damit etwa dem Sohlenmaterial, so dass der Tracer nur bewegt wurde, wenn die Schubspannung groß genug war, um auch das Sohlenmaterial zu bewegen. Die Verteilungen der Tracer wurden im Jahr 1993, zwei Jahre nach der Zugabe und sechs Jahre später im Jahr 1999 gemessen. Ferguson & Hoey (2002) und Ferguson et al. (2002) stellten fest, dass die Transportgeschwindigkeiten der Tracer mit steigender Sohlenschubspannung und mit abnehmender Korngröße zunahmen.

Tab. 3.5: Charakteristika der Zugabestellen am Allt Dubhaig (Ferguson & Wathen, 1998)

Fluss-km	Sohlengefälle I [-]	Sohlenschubspannung τ_0 [N/m ²]	Sohlenoberfläche	
			d_{50} [mm]	d_{84} [mm]
0,19	0,017	110 ± 4	96 ± 4	233 ± 8
0,47	0,013	89 ± 9	101 ± 4	215 ± 2
0,78	0,013	73 ± 1	65 ± 5	137 ± 10
1,28	0,006	54 ± 5	32 ± 2	75 ± 3
1,81	0,003	22 ± 1	41 ± 8	89 ± 11
2,40	0,003	32 ± 4	23 ± 2	50 ± 2

Die Geschwindigkeiten nahmen weiterhin, wie auch von Faulhaber und Riehl (2000) beobachtet, unabhängig von der Korngröße mit zunehmender Beobachtungszeit deutlich ab. Ferguson et al. (2002) führten dies auf eine vertikale Durchmischung des Tracers mit dem Sohlenmaterial zurück. Weiterhin folgerten Ferguson et al. (2002), dass der Einfluss der Korngröße und der Schubspannung mit der Zeit abnimmt. Anhand der ermittelten Transportweiten leiteten sie folgende empirische Gleichung zur Berechnung der mittleren dimensionslosen Transportgeschwindigkeit u_G^* ab:

$$u_G^* = \frac{u_T}{\sqrt{g \cdot d_T}} = a \cdot \tau^{*b} \cdot e^{(c \cdot d_T / d_{50b})}. \quad (3.10)$$

Darin ist u_T [m/s] die mittlere Geschwindigkeit des Tracers mit der Korngröße d_T . Die dimensionslose Schubspannung τ^* (Gl. 2.2) wird mit dem charakteristischen Korndurchmesser d_{50b} zu $\tau^* = \tau_0 / [(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d_{50b}]$ berechnet. Die Koeffizienten a , b und c hängen von dem Beobachtungszeitraum ab. In Tab. 3.6 sind die von Ferguson et al. (2002) ermittelten Werte für die Koeffizienten zusammengefasst.

Tab. 3.6: Koeffizienten für die Formel nach Ferguson et al. (2002) für unterschiedliche Beobachtungszeiträume

Beobachtungszeitraum	a	b	c
1991-1993	0,0075	0,85	-1,25
1991-1999	0,0013	0,52	-1,19
1993-1999	0,00026	0,19	-1,08

3.2.2.3 Laborversuche zur Ausbreitung von externem Geschiebe mit statischer Deckschicht

SKLAR ET AL. (2009) führten eine experimentelle Studie zur Advektion und Dispersion von externem Geschiebe über statischen Deckschichten durch. In einer 28 m langen und 0,86 m breiten Versuchsrinne wurde zunächst eine statische Deckschicht hergestellt. Hierzu wurde bei konstantem Durchfluss das Ausgangsmaterial der Deckschicht mit einer Körnung von 2 - 32 mm und einem d_{50} von 8 mm mit einer konstanten Beschickungsrate in die Versuchsrinne gegeben. Nach Erreichen des Gleichgewichtstransports wurde die Sedimentzugabe schrittweise bis auf 0 kg/h reduziert, wobei der Durchfluss konstant gehalten wurde. Die Selbststabilisierung der Sohlenoberfläche bzw. die Ausbildung der statischen Deckschicht galt bei einem Geschiebeaustrag aus der Rinne von 1 – 2 kg als abgeschlossen. Die Deckschicht wies einen mittleren Korndurchmesser von $d_{50} = 12,5$ mm mit der kritischen Sohlenschubspannung $\tau_c = 8,8$ N/m² auf. Nach der Ausbildung der Deckschicht gaben Sklar et al. (2009) farblich gekennzeichneten Geschiebetracer mit den Mengen von 68 kg und 267 kg in die Versuchsrinne. Die Zugabe erfolgte bei kritischem Durchfluss der Deckschicht mit einer konstanten Beschickungsrate über eine Zeitspanne von 25 bzw. 100 min. Zur Variation der Tracergröße wurden zwei verschiedene Kiesfraktionen mit den Korngrößen $d_T = 2,8$ mm und $d_T = 8$ mm verwendet. Sklar et al. (2009) beobachteten eine mit der Versuchszeit abflachende Verteilung des Geschiebetracers. Der Transport erfolgte als Kombination aus Advektion und Dispersion, wobei die Dispersion dominierte. Weiterhin stellten sie fest, dass die kleineren Tracer schneller transportiert wurden als die größeren und dass bei den größeren Geschiebemengen die höheren Transportgeschwindigkeiten auftraten. Mit zunehmender Versuchszeit nahm die Geschwindigkeit in allen Versuchsdurchläufen signifikant ab, obwohl im Gegensatz zu den Untersuchungen von Faulhaber und Riehl (2001), Ferguson et al. (2002) und Promny (2008a, b), keine signifikante vertikale Durchmischung des Tracers mit der Deckschicht auftrat. In Tab. 3.7 sind Tracergeschwindigkeiten, die für unterschiedliche Messzeitpunkte aus den Resultaten von Sklar et al. (2009) ermittelt wurden, zusammengefasst.

Tab. 3.7: Aus Sklar et al. (2009) ermittelte Tracergeschwindigkeiten für unterschiedliche Messzeitpunkte, Korngrößen und Zugabemengen

Zugabemenge [kg]	d_{50T} [mm]	t [min]	u_T [m/h]
68	2,8	26	16,15
		34	15,98
68	8	40	12,53
		69	4,01
		113	1,94
		163	2,03
267	8	114	3,65

3.2.2.4 Zusammenfassung der Untersuchungen zur Geschiebeausbreitung

Die Mehrzahl der vorangehend vorgestellten Untersuchungen befasst sich mit dem Transport bzw. der Ausbreitung von externem Material, das gemeinsam mit dem anstehenden Sohlenmaterial transportiert wird (Cui et al., 2003a, b; Faulhaber & Riehl 2001; Ferguson et al. 2002; Gölz & Trompeter, 2001; Lisle et al., 1997, 2001; Promny, 2008a, b; Wong et al., 2007). Die einzige Ausnahme bilden die Laborversuche von Sklar et al. (2009), in denen der Transport von externem Geschiebe auf statischen Deckschichten untersucht wird.

Es bestätigt sich, dass der Transportvorgang einer externen, limitierten Geschiebemenge ein instationärer Transportvorgang ist, der in Folge einer Kombination aus Advektion und Dispersion zu einer zunehmenden Ausbreitung des zugegebenen Materials auf der Sohle führt. In den vorgestellten Untersuchungen wird, mit Ausnahme der Arbeiten von Lisle et al. (1997, 2001) und Wong et al. (2007), von einer Abnahme der Ausbreitungsgeschwindigkeit des externen Geschiebes mit der Versuchszeit berichtet. Die Ursache hierfür wird in den Studien mit bewegter Sohle auf die vertikale Durchmischung des Zugabematerials mit dem Sohlenmaterial zurückgeführt. Die Geschwindigkeitsabnahme wurde allerdings auch von Sklar et al. (2009) beobachtet, obwohl in ihren Versuchen mit einer statischen Deckschicht keine signifikante Vermischung des Tracers mit der Sohle beobachtet wurde. Weiterhin wurde in den Versuchen beobachtet, dass die Transportgeschwindigkeit mit kleiner werdendem Tracer (Faulhaber & Riehl 2001; Ferguson et al. 2002; Gölz & Trompeter, 2001; Sklar et al., 2009) und mit größer werdendem Strömungsangriff (Wong et al., 2007) zunimmt. Sklar et al. (2009) stellte weiterhin fest, dass die Transportgeschwindigkeit des Tracers mit der Zugabemenge ebenfalls zunimmt.

Eine Gleichung für die Beschreibung des Transports einer externen Geschiebemenge, die die Summe der hier zusammengefassten Einflussfaktoren berücksichtigt, existiert in der Literatur nicht.

4 Ableitung offener Fragestellungen

Der im zweiten und dritten Kap. aufbereitete Stand des Wissens verdeutlicht, dass die Ausbreitung einer limitierten Menge externen Geschiebes auf einer statischen Deckschicht ein hochgradig instationärer Prozess ist. Durch die begrenzte Geschiebeverfügbarkeit und der sich durch den Transport von Geschiebe ständig ändernden Randbedingungen ist ein stationärer Gleichgewichtstransport zu keinem Zeitpunkt möglich. Das zu beschreibende Transportgeschehen erfüllt in keiner Weise die Randbedingung, die für die Anwendung der Ansätze für den Gleichgewichtstransport (vgl. Kap. 3.1) erfüllt sein müssen, weshalb eine Verwendung dieser Formeln nicht zielführend ist. Vielmehr gilt es die zeitliche Entwicklung der Geschiebeausbreitung hinsichtlich der Transportgeschwindigkeit und Transportweite zu beschreiben.

In der Literaturstudie zur Ausbreitung eines Geschiebedepots (Kap. 3.2) wurden hydraulische und sedimentologische Faktoren identifiziert, die die Geschiebeausbreitung beeinflussen. Der hydraulische Einfluss wird in dem Strömungsangriff zusammengefasst. Die sedimentologischen Einflussgrößen, die in der Literatur genannt werden, sind die Korngröße des externen Materials und die Zugabemenge.

Ein weiterer Einflussfaktor des Sediments geht aus dem in Kap. 2.1.1 beschriebenen veränderten Bewegungsbeginn eines Korns infolge des relativen Herausragens hervor. Bei dem Transport über eine statische Deckschicht wird das externe Material über eine raue Sohle transportiert, die aufgrund ihrer groben Struktur Lücken in ihrer Oberfläche aufweist, in die ein Korn hineingeraten kann. Das bedeutet, dass die Körner des Zugabematerials entweder exponiert auf der Sohle oder im Strömungsschatten größerer Körner der Sohlenoberfläche liegen können. Diese unterschiedliche Lage auf der Sohlenoberfläche hat dann, analog zum relativen Herausragen aus einer locker gelagerten Kiessohle, einen Einfluss auf den Bewegungsbeginn eines Korns. Eine direkte Übertragung der verfügbaren Ansätze ist jedoch nicht möglich, da diese nur für den Fall eines sich vollständig in Bewegung befindlichen Korngemischs gültig sind.

Die Ausbreitung von externem Geschiebe auf einer statischen Deckschicht blieb in der Literatur bisher weitestgehend unberücksichtigt, und es existiert derzeit noch kein Ansatz für die Beschreibung der damit verbundenen Transportprozesse. Die verfügbaren Studien betrachten fast ausschließlich den gemeinsamen Transport von Sohlenmaterial und externem Material. Zur Verbesserung des Prozessverständnisses ist also zunächst eine grundsätzliche Dokumen-

tation und Quantifizierung der Ausbreitungsvorgänge im Hinblick auf die oben genannten Einflussgrößen und die zeitliche Entwicklung des Transportgeschehens erforderlich.

Anhand der daraus gewonnenen Erkenntnisse werden die Fragestellungen nach dem Einfluss der hydraulischen Randbedingungen sowie der sedimentologischen Eigenschaften des externen Materials und der Deckschicht auf den Ausbreitungsvorgang untersucht.

Hierzu wird im Folgenden zunächst eine Dimensionsanalyse durchgeführt, in der die Einflussfaktoren zu dimensionslosen Parametern zusammengefasst werden. Die Bedeutung der hergeleiteten dimensionslosen Parameter wird dann anhand der darauf folgend beschriebenen experimentellen Studie und der Analyse der Versuchsergebnisse systematisch untersucht und quantifiziert. Auf Grundlage des dadurch erweiterten Wissens soll eine empirische Beziehung für die Beschreibung des Transports einer limitierten Geschiebemenge über statische Deckschichten formuliert werden.

5 Dimensionsanalyse

Die Dimensionsanalyse ist ein wichtiges Hilfsmittel für die experimentelle Forschung im Wasserbau. Mit ihr kann das grundlegende Zusammenspiel der verschiedenen Einflussfaktoren auf einen zu untersuchenden physikalischen Prozess erfasst werden, auch wenn Gesetzmäßigkeiten noch unbekannt sind. Basierend auf einem grundsätzlichen physikalischen Verständnis des untersuchten Phänomens werden aus den dimensionsbehafteten Einflussgrößen sog. dimensionslose Kenngrößen gebildet, mit denen der physikalische Prozess beschrieben werden kann. Detaillierte Empfehlungen zur Anwendung der Dimensionsanalyse im experimentellen Wasserbau finden sich in Aberle & Mertens (2006). Im Folgenden wird die Dimensionsanalyse für die Parameter, die einen Einfluss auf die Ausbreitung einer limitierten Geschiebemenge auf einer statischen Deckschicht haben, durchgeführt.

Das Ziel der Dimensionsanalyse ist es, die Geschiebeverlagerung durch einen dimensionslosen funktionalen Zusammenhang zu beschreiben. Die Geschiebeverlagerung wird dabei durch die Transportgeschwindigkeit u_T charakterisiert. Das untersuchte System besteht aus dem Fluid, das die treibende Kraft darstellt, dem transportierten externen Geschiebe (im folgenden auch als Tracer bezeichnet) und der statischen Deckschicht, die selbst nicht transportiert wird, aber für die Rauheitsstruktur der Sohle maßgebend ist. Die sedimentologischen Einflussfaktoren teilen sich deshalb in die Eigenschaften des Tracers und der Deckschicht auf. Aufbauend auf umfangreichen Vorversuchen und physikalischen Überlegungen kommen die in Tabelle 5.1 zusammengestellten Einflussgrößen in Betracht. Der angegebene Variationsbereich umfasst dabei alle in Kap. 6 beschriebenen Versuche, d.h. Versuche, die in zwei unterschiedlichen Versuchsrinnen mit unterschiedlichen Abmessungen und unterschiedlichen Variationen der Parameter durchgeführt wurden (vgl. Kap. 6).

Tab. 5.1: Dimensionsbehaftete Ausgangsparameter für die Dimensionsanalyse und ihr Wertebereich in den Experimenten

	Parameter	Symbol	Einheit	Wert / Variationsbereich
Strömung	Dichte des Fluids	ρ	[kg/m ³]	1000 kg/m ³
	kinematische Viskosität	ν	[m ² /s]	1*10 ⁻⁶ m ² /s
	Fließtiefe	h	[m]	0,13-0,275 m
	Gefälle	I	[-]	5 ‰
Deckschicht	Korndurchmesser	d_s	[m]	d _{50S} = 12,2 / 19 / 23 mm
	Sieblinie	σ_s	[-]	1,5 bis 2,3
	Dichte	ρ_s	[kg/m ³]	2600 kg/m ³
Tracer	Korndurchmesser	d_T	[m]	1-3 mm bis 11-16 mm
	Sieblinie	σ_T	[-]	≤ 1,25
	Dichte	ρ_s	[kg/m ³]	2600 kg/m ³
	Zugabemenge	M_T	[kg]	1,1-5,3 kg
Geometrie der Tracerbarre	Länge	l_T	[m]	0,125-0,6 m
	Breite	b_T	[m]	0,3-0,5 m
	Höhe	h_T	[m]	0,015-0,025 m
	Lagerungsdichte	ρ_L	[kg/m ³]	1550 bis 1750 kg/m ³
Allgemeine physikalische Größen	Erdbeschleunigung	g	[m/s ²]	9,81 m/s ²
	Zeit	t	[s]	0-930 min

Entsprechend der Zusammenstellung in Tab. 5.1 ergibt sich für die Dimensionsanalyse zusammen mit der gesuchten Transportgeschwindigkeit u_T ein Ausgangssystem mit 18 Parametern. Aus der Dimensionsanalyse würden daraus 14 dimensionslose Parameter für die Beschreibung der gesuchten Größe resultieren, vgl. Aberle & Mertens (2006). Da diese Anzahl der Variablen für die Experimente zu groß ist, müssen sinnvolle Festlegungen der Randbedingungen getroffen werden, die den Gültigkeitsbereich der Ergebnisse einschränken. Die Zahl der zu berücksichtigenden Einflussgrößen kann dann durch Vorüberlegungen reduziert werden.

Bei den nachfolgend beschriebenen experimentellen Untersuchungen (Kap. 6) handelt es sich um zweidimensionale Rinnenversuche, bei denen sich die Geschiebebarre über die komplette Breite des Fließquerschnitts erstreckt. Deshalb werden die Breite und die Tracermasse zu der

Zugabemenge je Breitereinheit $m_T = M_T / b_T$ [kg/m] zusammengezogen. Weiterhin wurde die Höhe der Tracerbarre h_T auf Grundlage von Vorversuchen so gewählt ($h_T \leq 0,025$ m), dass der Einfluss der Höhe auf die Transportgeschwindigkeit vernachlässigbar klein war, da die ansonsten auftretenden Transportphänomene die untersuchten Transportprozesse stören würden. Dementsprechend war dieser Aspekt also nicht Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Arbeit und die Höhe der Tracerbarre h_T entfällt in der Dimensionsanalyse. Die Zugabe der Tracer erfolgte generell in einer lockeren Lagerung, so dass die Lagerungsdichte ρ_L nur in einem geringen Maße (ca. 1550 bis 1750 kg/m³) variiert wurde. Ein Einfluss der Lagerungsdichte auf den Transport wurde für diesen Variationsbereich nicht festgestellt, so dass ρ_L in den weiteren Betrachtungen ebenfalls nicht berücksichtigt wird. Unter der Annahme einer annähernd konstanten Lagerungsdichte und einer vernachlässigbaren Höhenvariation der Tracerbarre ist die Länge der Tracerbarre durch die Zugabemenge vorgegeben und somit implizit enthalten, so dass diese in der weiteren Betrachtung entfällt. In den Versuchen wurde weiterhin der fraktionsweise Transport von externem Geschiebe untersucht, wobei die einzelnen eng abgestuften Fraktionen als Einkornmaterial betrachtet werden können. Die Standardabweichung σ_T der Sieblinie der Tracer wurde damit in den Versuchen nicht variiert und fällt somit aus der Dimensionsbetrachtung ebenfalls heraus. Die charakterisierenden Einflussgrößen der Deckschicht werden für die Berücksichtigung des Einflusses der Rauheit der Sohlenoberfläche auf den Transport des externen Materials verwendet. In dieser Arbeit erfolgt die Beschreibung des Einflusses der Deckschicht, analog zu den Ansätzen zur äquivalenten Sandrauheit (vgl. Kap. 2.2.2), anhand eines charakteristischen Korndurchmessers der Deckschicht, so dass hier die Standardabweichung der Sieblinie des Sohlenmaterials σ_S zunächst unberücksichtigt bleibt. Insgesamt ergeben sich somit für die Dimensionsanalyse 11 verbleibende Ausgangsparameter.

$$f[u_T, \underbrace{h, I, \nu, \rho}_{\text{Fluid}}, \underbrace{d_S}_{\text{Deckschicht}}, \underbrace{d_T, m_T, \rho_S}_{\text{Tracer}}, g, t] \quad (5.1)$$

Entsprechend der Vorgehensweise von Yalin (1965) werden die Parameter ρ_S und I durch geeignete Parameter substituiert. Die Dichtedifferenz ($\rho_S - \rho$) ersetzt die Feststoffdichte ρ_S , da für Transportphänomene in Fließgewässern nicht die reine Feststoffdichte, sondern die Dichte unter Auftrieb relevant ist. Anstelle des Gefälles I wird die Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit $u_* = (g \cdot h \cdot I)^{0.5}$, die die treibende Kraft charakterisiert, eingesetzt.

Der funktionale Zusammenhang, für den die Dimensionsanalyse durchgeführt wird, lautet damit:

$$f[u_T, h, u_*, \nu, \rho, d_s, (\rho_s - \rho), d_T, m_T, g, t]. \quad (5.2)$$

Als wiederkehrende Basisparameter werden für die Masseneinheit die Dichte des Fluids ρ , für die Zeiteinheit die Erdbeschleunigung g und für die Länge der Korndurchmesser des Tracers d_T gewählt. Nach dem Π -Theorem nach Buckingham (1914) werden folgende dimensionslose Π -Parameter gebildet:

$$f\left[\frac{u_T}{\sqrt{g \cdot d_T}}, \frac{h}{d_T}, \frac{\sqrt{g \cdot d_T}^{1.5}}{\nu}, \frac{d_s}{d_T}, \frac{\rho_s - \rho}{\rho}, \frac{m_T}{\rho \cdot d_T^2}, \frac{u_*^2}{g \cdot d_T}, t \cdot \sqrt{\frac{g}{d_T}}\right]. \quad (5.3)$$

Im Weiteren werden basierend auf einem physikalischen Grundverständnis sinnvolle Kombinationen der Π -Parameter vorgenommen. Folgende Parameterkombination wird vorgenommen:

$$\frac{\frac{m_T}{\rho \cdot d_T^2}}{\frac{\rho_s - \rho}{\rho}} = \frac{m_T}{(\rho_s - \rho) \cdot d_T^2}. \quad (5.4)$$

Somit ergibt sich für die Ausbreitung von externem Geschiebe auf statischen Deckschichten folgender funktionaler Zusammenhang, bestehend aus sieben Π -Parametern, mit denen die Zielgröße beschrieben werden kann:

$$\frac{u_T}{\sqrt{g \cdot d_T}} = f\left[\frac{\sqrt{g \cdot d_T}^{1.5}}{\nu}, \frac{d_s}{d_T}, \frac{h}{d_T}, \frac{\rho_s - \rho}{\rho}, \frac{m_T}{(\rho_s - \rho) \cdot d_T^2}, \frac{u_*^2}{g \cdot d_T}, t \cdot \sqrt{\frac{g}{d_T}}\right]. \quad (5.5)$$

Darin wird mit

$$\frac{\sqrt{g \cdot d_T}^{1.5}}{\nu}$$

der Einfluss der kinematischen Viskosität des Fluids berücksichtigt. In der vorliegenden Untersuchung zur Bewegung kleiner Tracermengen über einer statischen Deckschicht kann jedoch von einer voll turbulenten Strömung ausgegangen werden, da die Turbulenzstruktur nicht aus dem transportierten Material mit der Korngröße d_T , sondern aus der Oberflächenstruktur der Deckschicht resultiert und somit mit Korn-Reynolds-Zahlen von $Re_* \gg 180$ gerechnet werden kann. Deshalb kann dieser Term hier vernachlässigt werden.

Der Ausdruck d_s/d_T ist das Verhältnis der Rauheit der Deckschicht (vgl. Abschnitt 2.2.2) zur Tracergröße. Der Kehrwert hiervon (d_T/d_s) stellt einen einfachen Term zur Berücksichtigung

des relativen Herausragens (vgl. Abschnitt 2.1.2) eines Tracerkorns aus der Sohlenoberfläche dar und wird im Weiteren auch als d^* bezeichnet.

Das Verhältnis

$$\frac{h}{d_T} = \varepsilon \quad (5.6)$$

ist die relative Überdeckung. Es beträgt in allen in Kap. 6 beschriebenen Versuchen $h/d_T \geq 15$. Gemäß den Erkenntnissen von Suszka (1991) kann damit eine Berücksichtigung der relativen Überdeckung entfallen (vgl. Kap. 2.1.4).

Hierdurch wird die Zahl der Einflussfaktoren auf fünf reduziert:

$$\frac{u_T}{\sqrt{g \cdot d_T}} = f \left[\frac{d_T}{d_s}, \frac{m_T}{(\rho_s - \rho) \cdot b_T \cdot d_T^2}, \frac{\rho_s - \rho}{\rho}, \frac{u_*^2}{g \cdot d_T}, t \cdot \sqrt{\frac{g}{d_T}} \right]. \quad (5.7)$$

Die Masse des Tracers je Breitereinheit m_T wurde über die Korngröße d_T und die Dichte unter Auftrieb $(\rho_s - \rho)$ dimensionslos gemacht. Sie wird als dimensionslose Tracermenge m_T^* definiert und ist die auf das Korn bezogene Zugabemenge je Breitereinheit. Der Term $(\rho_s - \rho)$ wird dabei an dieser Stelle durch ρ_s substituiert, da mit m_T^* die Zugabemenge unabhängig vom Fluid beschrieben werden soll und hierfür die Dichte unter Auftrieb ungeeignet ist:

$$m_T^* = \frac{m_T}{\rho_s \cdot d_T^2}. \quad (5.8)$$

Die auf das Korn wirkende Strömungskraft wird über den Term

$$\frac{u_*^2}{g \cdot d_T} = \frac{g \cdot h \cdot I}{g \cdot d_T} \quad (5.9)$$

berücksichtigt, der durch eine Erweiterung um den Kehrwert der relativen Dichte zu der auf den Korndurchmesser des Tracers bezogenen dimensionslosen Schubspannung τ_T^* wird:

$$\tau_T^* = \frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot I}{(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d_T} = \frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d_T}. \quad (5.10)$$

Die dimensionslose Versuchszeit t^* ergibt sich aus der Dimensionsanalyse zu:

$$t^* = t \cdot \sqrt{\frac{g}{d_T}}. \quad (5.11)$$

Die gesuchte Größe des funktionalen Zusammenhangs in Gl. (5.7) ist die mittlere dimensionslose Transportgeschwindigkeit u_G^* , die dort wie folgt definiert ist:

$$u_G^* = \frac{u_T}{\sqrt{g \cdot d_T}} \quad (5.12)$$

Durch die Multiplikation des Nenners mit $((\rho_s - \rho)/\rho)^{0,5}$ ergibt sich daraus die von Wong (2007) verwendete Definition (vgl. Gl. 3.13), die in der Versuchsauswertung in Kap. 7 verwendet wird:

$$u_G^* = \frac{u_T}{\sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot g \cdot d_T}} \quad (5.13)$$

Da in den Versuchen keine Variation des Parameters $(\rho_s - \rho)/\rho$ erfolgt, wird dieser im Weiteren nicht mehr gesondert berücksichtigt.

Mit den hergeleiteten dimensionslosen Parametern des funktionalen Zusammenhangs für das untersuchte Ausbreitungsphänomen ist die Basis dafür geschaffen, anhand der im folgenden beschriebenen Versuche eine empirische Formel zur Berechnung der Transportgeschwindigkeit u_G^* abzuleiten. Allgemein geschrieben lässt sich die Gleichung wie folgt formulieren:

$$u_G^* = a_1 \cdot \left(\frac{m_T}{\rho_s \cdot d_T^2} \right)^{b_1} \cdot a_2 \cdot \left(\frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot I}{(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d_T} \right)^{b_2} \cdot a_3 \cdot \left(t \cdot \sqrt{\frac{g}{d_T}} \right)^{b_3} \cdot a_4 \cdot \left(\frac{d_T}{d_s} \right)^{b_4} \quad (5.14)$$

6 Versuche

In den Laborversuchen wurde die Ausbreitung einer verhältnismäßig kleinen Menge externen Geschiebes auf statischen Deckschichten untersucht. Hierzu wurden zunächst die Deckschichten gebildet und darauf folgend der als Barre zugegebene Kies (Tracer) unterschiedlicher Fraktionen mit Korngrößen von 1 - 16 mm strömungsinduziert über die Deckschicht transportiert.

Im Folgenden werden der Versuchsaufbau, das verwendete Sediment und die Versuchsdurchführung beschrieben. Die Versuchsergebnisse werden in Kap. 6.5 vorgestellt.

6.1 Versuchsaufbau

Die Versuche wurden in zwei unterschiedlichen Versuchsrinnen im Leichtweiß-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig durchgeführt. Die größere der beiden Rinnen ist eine hydraulische Kipprinne, d.h. die Rinnenneigung kann frei verstellt werden. Die kleinere Rinne ist eine horizontale Rinne und wird im Folgenden als „Kleine Rinne“ bezeichnet.

6.1.1 Rinne 1 - Hydraulische Kipprinne

Die hydraulische Kipprinne mit einem Neigungsbereich von -1,5 % bis +1,5 % hat eine Länge von $l = 20$ m, eine Breite von $b = 0,9$ m und eine maximale Fließtiefe von $h = 0,595$ m (vgl. Abb. 6.1). Über der Rinnenmitte ist eine 3D-Traversierung angeordnet, die in Y-Richtung über die gesamte Rinnenbreite und in X-Richtung (Längsachse) über eine Strecke von 2,65 m verfahren werden kann. Zur Regulierung der Wasserspiegellage ist am Ende der Rinne eine einstellbare Regulierklappe angeordnet.

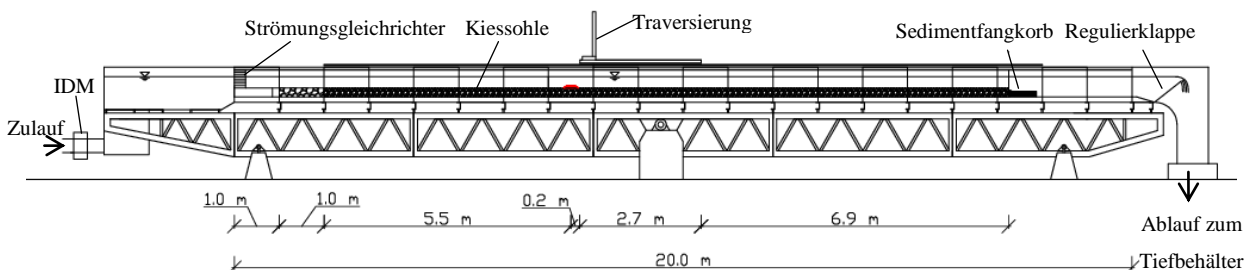


Abb. 6.1: Hydraulische Kipprinne

Um die Dreidimensionalität der Strömung möglichst gering zu halten und um die erforderliche Menge an Sohlenmaterial zu verringern wurde die Rinne auf einer Länge von 17,3 m mittels einer Trennwand aus PVC-Platten auf eine Breite von 0,5 m reduziert. Das Wasser strömt

aus dem Kopftank über den 1 m langen Überleitungsbereich mit den Strömungsgleichrichtern in die Rinne. An den Strömungsgleichrichter schließt eine 1 m lange, flache raue Rampe, bestehend aus einer Grobkiesschüttung, an, um ein Schießen der Strömung im Einlaufbereich und einen damit verbundenen Fließwechsel oberhalb der Versuchssohle zu vermeiden. Unterstrom davon wurde das Ausgangsmaterial für die Deckschichtbildung mit einer konstanten Schichtstärke von 0,2 m auf einer Länge von 15,3 m eingebaut und am unterstromigen Ende durch ein 0,2 m hohes Lochblech abgestützt. Das Lochblech verhinderte ein Abrutschen der Kiessohle und gewährleistete die Durchströmbarkeit des Bodenkörpers. Die Rinnenneigung wurde für alle Versuche auf $I_s = 0,5\%$ eingestellt. Durch die Einengung der Rinne entstand unterhalb des Versuchsbereichs ein Aufweitungsbereich, der der Strömungsberuhigung diente. In diesem Bereich wurde das aus der Sohle ausgetragene Material mittels eines dort angeordneten Geschiebefangkorb gesammelt.

6.1.2 Rinne 2 - Kleine Rinne

Die „Kleine Rinne“ hat eine Länge von $l = 6\text{ m}$, eine Breite von $b = 0,3\text{ m}$ und eine Höhe von $h = 0,4\text{ m}$ (vgl. Abb. 6.2). Im Gegensatz zur hydraulischen Kipprinne besitzt die Rinne eine horizontale Sohle und ist nicht neigbar. Zur Regulierung der Wasserspiegellage befindet sich im Auslaufbereich der Rinne ebenfalls eine einstellbare Regulierklappe.

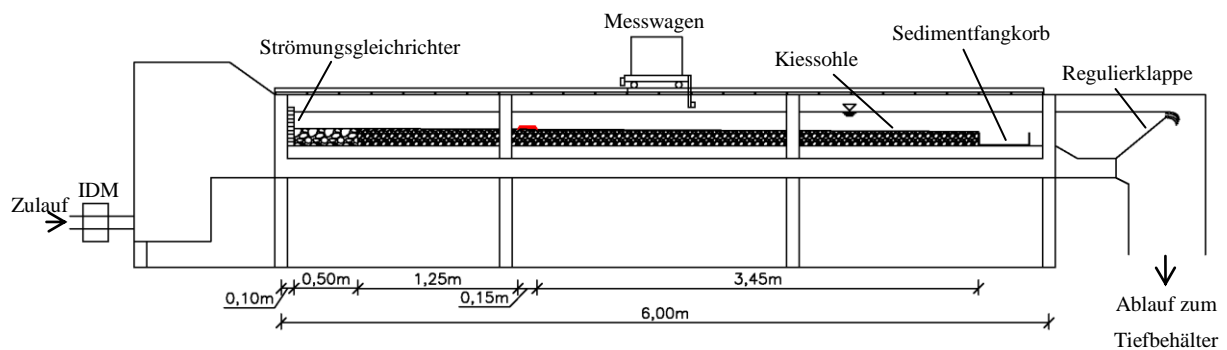


Abb. 6.2: „Kleine Rinne“

Im Einströmbereich der Rinne sind ein Strömungsgleichrichter und eine 0,5 m lange flache, raue Rampe angeordnet, auf der der Fließwechsel von Schießen zu Strömen stattfindet. Daran anschließend wurde auf einer Länge von 4,85 m das Ausgangsmaterial für die Deckschichtbildung mit einer Neigung von $0,5\%$ eingebaut. Die mittlere Schichtstärke betrug 0,125 m. Die Kiessohle wurde an ihrem unterstromigen Ende durch ein 0,11 m hohes Lochblech gestützt, so dass auch hier die Durchströmung des Kieskörpers gewährleistet war. Im Anschluss daran war der Sedimentfangkorb angeordnet. Die Versuchsrinne ist mit einem selbstfahrenden Messwagen ausgestattet, der auf einem Schienensystem die komplette Rinnenlänge abfahren kann.

6.2 Messtechnik

Die Durchflussmessung erfolgte in beiden Versuchsrinnen mit einem induktiven Durchflussmesser (IDM) im Rinnenzulauf mit einer Messgenauigkeit von $\pm 1\%$ für Abflüsse von $Q > 5$ l/s. Die Wasserspiegellage wurde in der 20 m langen hydraulischen Kipprinne über 10 Drucksonden in einem Abstand von 1,5 m gemessen. Die Drucksonden sind entlang der Versuchssohle plan abschließend in der PVC-Trennwand angeordnet. Die Messung erfolgt mit einem linear verschiebbaren Stechpegel in Beruhigungszy lindern an einer Pegelharfe mit einer Ablesegenauigkeit von $\pm 0,1$ mm. Die Sohlenhöhe und das Sohlengefälle wurden mit Hilfe von Höhennivelements bestimmt. Die Vermessung der Sohle erfolgte dabei über die komplette Länge mit einem Messabstand von 0,1 m. Die Ablesegenauigkeit des Nivelliergerätes beträgt $\pm 0,5$ mm.

Zur Erfassung der Oberflächenstruktur wurde weiterhin in der hydraulischen Kipprinne die Topographie der Sohle mit einem Abstandslaser, der an der Traversierung befestigt war, hoch aufgelöst vermessen. Das Messraster betrug dabei 4 mm in y-Richtung und 1 mm in Längsrichtung auf einer Scanfläche von 0,4 x 2,6 m. Die Messgenauigkeit des Abstandslasers beträgt $\pm 0,1$ mm.

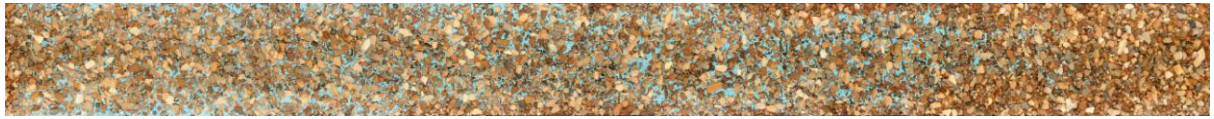
In der „kleinen Rinne“ wurde die Wasserspiegellage mit einem Ultraschallsensor, der auf dem Messwagen installiert war, mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1$ mm digital aufgezeichnet. Die Sohlenlage wurde mit einem ebenfalls auf dem Messwagen angebrachten Ultraschallsensor mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5$ mm aufgenommen.

Die Sieblinie der Sohlenoberfläche wurde jeweils anhand von Sohlenfotografien mit Hilfe der Linienzahlanalyse nach Fehr (1987) bestimmt. Die hierfür erforderlichen Sohlenfotografien wurden in dem späteren Messbereich für die Hauptversuche aufgenommen. Dies war in der hydraulischen Kipprinne der Bereich zwischen den Rinnenpositionen 7 m und 15 m und in der „kleinen Rinne“ der Bereich zwischen den Rinnenpositionen 2 m und 4 m.

Für die Untersuchung des Transportverhaltens von externem Geschiebe wurde das Zugabematerial in beiden Rinnen abhängig von der Kornklasse unterschiedlich eingefärbt. Die Ausbreitung des so gekennzeichneten Tracers wurde anhand von orthogonalen Fotografien bestimmt und über die Masse an zugegebenen Tracer kalibriert. Hierzu wurden die Tracerversuche in festgelegten Zeitschritten unterbrochen und die trockene Rinnensohle fotografiert. Anhand dieser Fotos wurde dann die Verteilung des farblich gekennzeichneten Tracers mit computergestützten Bildauswerteverfahren in einem Raster von $\Delta x = \Delta y = 5$ cm ermittelt. In Abb. 6.3 sind die Sohlenfotografie einer Versuchssohle nach einer Versuchszeit von 30 min mit

einer Tracergröße von 3-5 mm und die Bildanalyse zur Ermittlung der Tracerverteilung dargestellt.

a) Orthogonale Sohlenfotografie



b) Tracerverteilung aus Bildanalyse

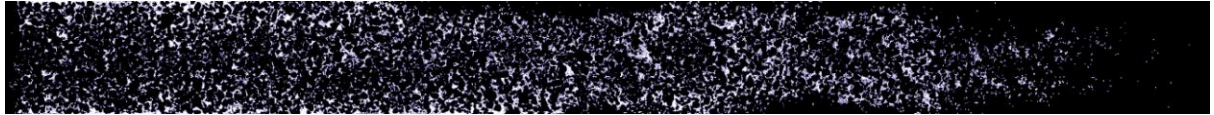


Abb. 6.3: Verteilung der Tracer, $d_T = 3-5$ mm auf der Deckschicht nach $t = 30$ min,
a) orthogonale Sohlenfotografie, b) Tracerverteilung aus der Bildanalyse

Zusätzlich zu der Bildanalyse wurden die Tracer nach Beendigung der Versuche in einem Raster von $\Delta x = \Delta y = 10$ cm von der Sohle abgesammelt und die Verteilung durch Wägung bestimmt. Abb. 6.4 zeigt den Vergleich der Bestimmung der Längsverteilung der Tracer anhand der Wägung und anhand des Bildanalyseverfahrens für einen Versuch mit $d_T = 5-8$ mm nach einer Versuchszeit von 930 min.

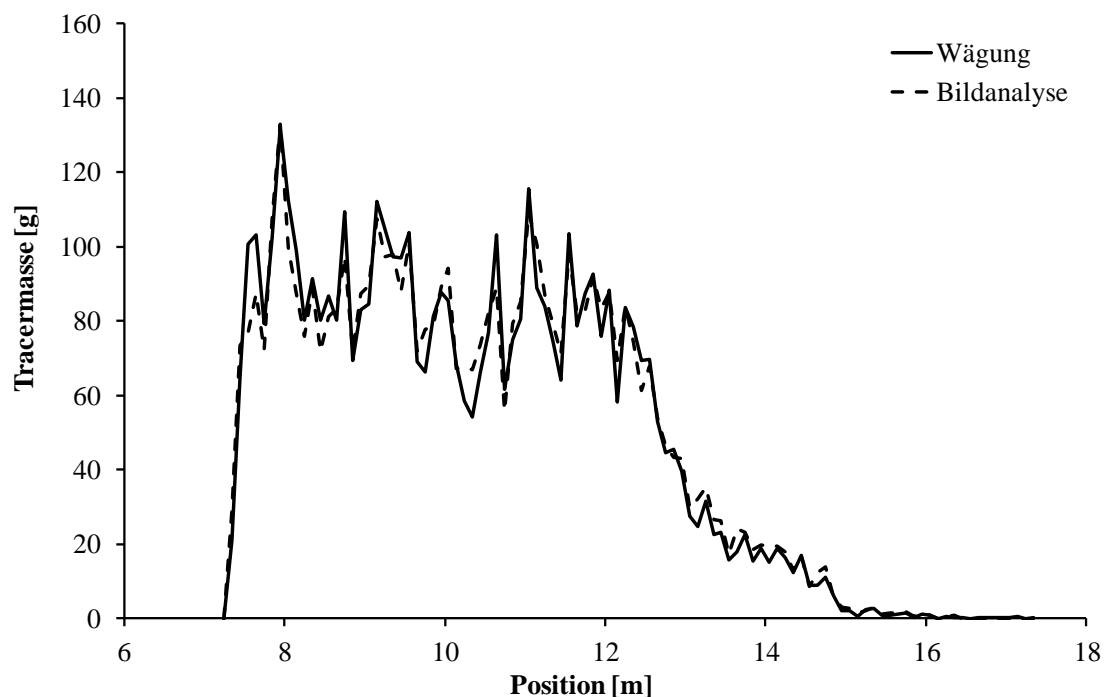


Abb. 6.4: Vergleich der ermittelten Längsverteilung der Tracer auf der Deckschicht aus Wägung und Bildanalyse, $d_T = 5-8$ mm, $t = 930$ min

Es zeigt sich, dass die aus der Bildanalyse ermittelte Längsverteilung sehr gut die durch Wägung gemessene Verteilung wiedergibt. Damit ist eine gute Genauigkeit für die Bestimmung von Tracerfront und -schwerpunkt möglich. Durch den Vergleich der Ergebnisse der Bildanalyse und der Wägung wurde die Messgenauigkeit des Bildanalyseverfahrens im Mittel auf ± 5 cm bestimmt.

Das während der Versuche ausgetragene Geschiebe wurde in den Fangkörben gesammelt und hinsichtlich der Masse, der Kornzusammensetzung und des Anteils an Zugabematerial analysiert.

6.3 Sedimentologische Eigenschaften

Das Sediment, dass für die Bildung der Deckschicht und für die Tracer verwendet wird, ist, wie aus der Dimensionsanalyse in Kap. 5 hervorgeht, ein wesentlicher Parameter für die Versuche. Im Folgenden werden das verwendete Ausgangsmaterial für die Deckschichten und die Deckschichten selber sowie die verwendeten Tracer beschrieben. Alle verwendeten Kiese sind natürlich abgerundet und weisen eine Sedimentdichte von $\rho_s = 2600 \text{ kg/m}^3$ auf.

6.3.1 Sohlensediment

Für die Auswahl der Versuchsmaterialien wurde die Deckschicht, die in dem Rheinabschnitt parallel zum Grand Canal d'Alsace ansteht, als natürliche Referenzdeckschicht gewählt. Bei der Deckschicht des Rheins handelt es sich um eine sehr grobe Deckschicht, die eine sehr steile Sieblinie aufweist. Sie hat einen mittleren Korndurchmesser von $d_{mD} = 106 \text{ mm}$ und ein Größtkorn $d_{max} = 161 \text{ mm}$ (Dittrich, 2010), vgl. Abb. 6.5.

Das ebenfalls durch Probenahmen bestimmte Unterschichtmaterial weist einen mittleren Korndurchmesser von $d_m = 74 \text{ mm}$ bei gleichem d_{max} auf. Der Mittelkornanteil der Sieblinie ist dabei nur sehr gering. Dies ist jedoch charakteristisch für natürliche Deckschichten, d.h. die Sieblinie des Ausgangsmaterials entspricht in ihrer Form eher der Sieblinie einer Deckschicht als der eines typischen Unterschichtmaterials. Für die Laborversuche wurde die Hypothese aufgestellt, dass es sich bei der in Abb.6.5 dargestellten Unterschicht bereits um eine Deckschicht handelt, aus der sich im Zuge der Genese des Restrheins die vorgefundene Deckschicht entwickelt hat. Für Experimente wurden die Rheinsedimente, bezogen auf das Größtkorn, im Maßstab 1:3 respektive 1:5 skaliert.

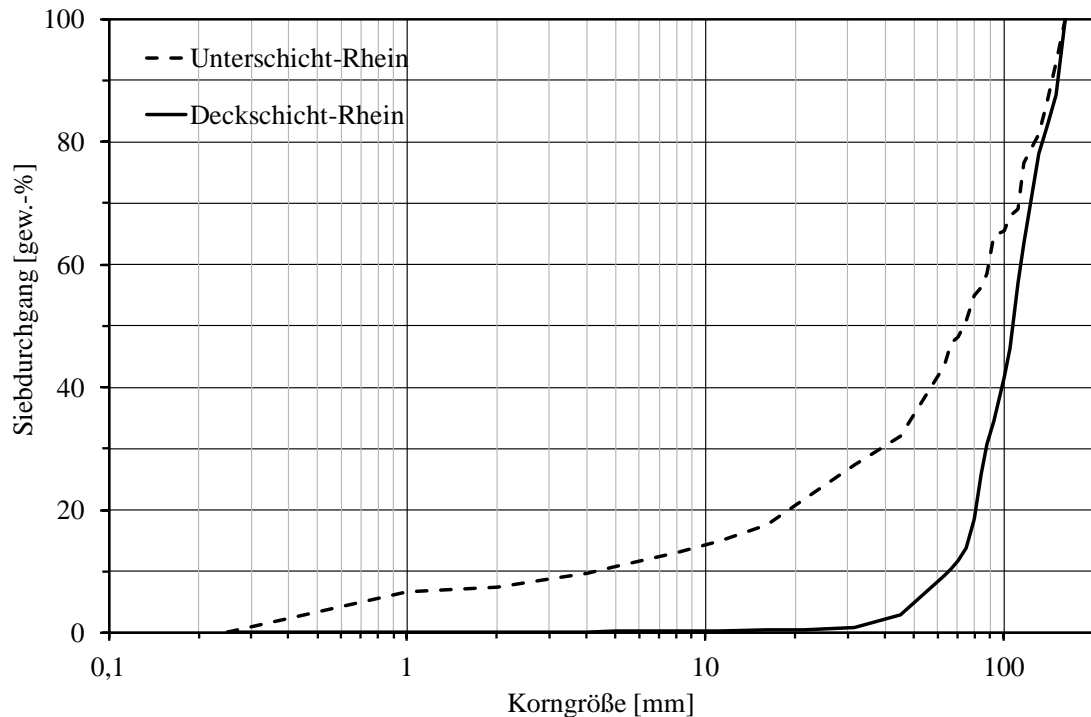


Abb. 6.5: Sieblinien und Sohlenfotografien der Unterschicht und der Deckschicht des Rheins (aus Dittrich 2010)

Basierend auf den vorhandenen sedimentologischen Daten wurden drei verschiedene Ausgangsmischungen A_{X1} , A_{X2} und A_{X3} festgelegt, die als locker gelagerte Kiesohe in die Versuchsrinnen eingebaut wurden. Daraus wurden durch selektive Erosion die Deckschichten Z_{X1} , D_{X2} und Z_{X3} mit ebener Sohle bei einem Sohlengefälle von $I_s = 0,5 \%$ hergestellt. Die Deckschichtbildung galt als abgeschlossen, wenn der Geschiebeaustrag aus der Sohle bei unverändertem Strömungsangriff vernachlässigbar klein war. Als Grenzkriterium hierfür wurde die dimensionslose Referenztransportrate $W_r^* = 0,00218$ nach Parker & Klingeman (1982) verwendet (vgl. Abschnitt 2.2.1).

6.3.1.1 Ausgangsmischung A_{X1} und Deckschicht Z_{X1}

Die gewählte Ausgangsmischung A_{X1} hat einen d_{max} von 55 mm bei einem d_m von 8,3 mm. Sie ist im Maßstab 1:3 skaliert das theoretisch ermittelte Unterschichtmaterial der im Rhein gemessenen Unterschicht. Hieraus wurde in der hydraulischen Kiprinne bei einem kritischen Abfluss von $Q_{crit} = 100$ l/s mit einer Fließtiefe von 0,218 m und einem Wasserspiegellagengefälle von $I = 0,5 \%$ die Deckschicht Z_{X1} im stabilen Zwischenzustand gebildet, d.h. es hätte noch eine gröbere Deckschicht entwickelt werden können.

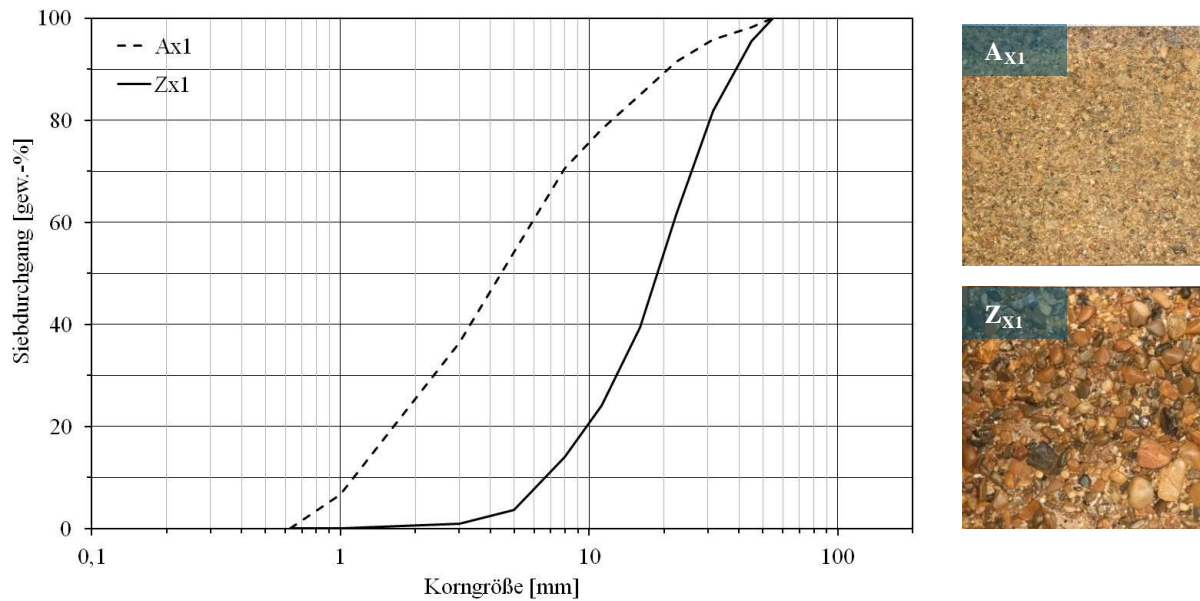


Abb. 6.6: Sieblinien und Sohlenfotografien der Ausgangsmischung A_{X1} und der Deckschicht Z_{X1}

Die maximale Sohlenschubspannung von $\tau_0 = 10,7 \text{ N/m}^2$ entspricht der kritischen Sohlenschubspannung $\tau_{0c,D}$ der Deckschicht. Abb. 6.6 zeigt die Sieblinien der Ausgangsmischung A_{X1} und der Deckschicht Z_{X1} . Ebenfalls enthalten sind Sohlenaufnahmen nach Einbau des Ausgangsmaterials und nach Beendigung des Abpflasterungsprozesses.

In Tab. 6.1 sind die charakteristischen Parameter der Ausgangsmischung und der Deckschicht zusammengefasst. Neben den wichtigsten charakteristischen Korngrößen sind dies die geometrische Standardabweichung σ_G (Gl. 2.4) und die kritische Sohlenschubspannung τ_{0c} . Weiterhin ist zur Charakterisierung der Rauheit der Sohle die Standardabweichung s der Deckschicht angegeben (vgl. Abschnitt 2.2.2), die anhand von Laserscans ermittelt wurde.

Tab. 6.1: Sedimentologische Parameter der Ausgangsmischung A_{X1} und der Deckschicht Z_{X1}

Material	τ_{0c} [N/m ²]	d_m [mm]	d_{16} [mm]	d_{50} [mm]	d_{84} [mm]	d_{90} [mm]	d_{max} [mm]	σ_G [-]	s [mm]
A_{X1}	6,1	8,3	1,6	4,5	15,3	21,0	55	3,1	-
Z_{X1}	10,7	21,6	8,6	19,0	34,5	39,6	55	2,0	7,6

Als Referenzwert für den Geschiebetransport wurde der Grundaustrag an Sohlenmaterial bestimmt, der nach Beendigung des Abpflasterungsprozesses vorlag. Hierfür wurde der Abfluss für weitere 8 h konstant gehalten und in einem Abstand von 30 min die Austragsmenge ge-

messen. Der daraus bestimmte mittlere Geschiebeaustrag aus der Deckschicht betrug $g_0 = 210$ g/m·h. Dies entspricht einer dimensionslosen Transportrate von $W^* = 0,00032$ und liegt damit deutlich unterhalb der dimensionslosen Referenztransportrate $W_r^* = 0,00218$, die von Parker & Klingeman (1982) als Merkmal des Bewegungsbeginns definiert wurde.

6.3.1.2 Ausgangsmischung A_{X2} und Deckschicht D_{X2}

Die Sieblinie des Ausgangsmaterials A_{X2} entspricht in einer linearen Skalierung von 1:5 dem anhand von Sedimentproben ermittelten Unterschichtmaterial des Rheins. Für die Ausgangsmischung folgt daraus ein mittlerer Korndurchmesser von 14,8 mm. Das Größtkorn maß 31,5 mm. Die daraus gebildete Deckschicht D_{X2} mit $d_m = 21,4$ mm entsprach, im Unterschied zu der vorangehend beschriebenen Deckschicht, der Deckschicht maximaler Sohlenstabilität und wurde in der hydraulischen Kipprinne mit einer Sohlenschubspannung von $13,5$ N/m² hergestellt. Der Durchfluss zur Deckschichtbildung betrug $Q_{crit} = 120$ l/s bei einer Fließtiefe von $0,275$ m und einem Gefälle von $I = 0,005$. In Abb. 6.7 sind die Sieblinien von A_{X2} und D_{X2} sowie Sohlenfotografien vor und nach Abpflasterung der Sohle dargestellt.

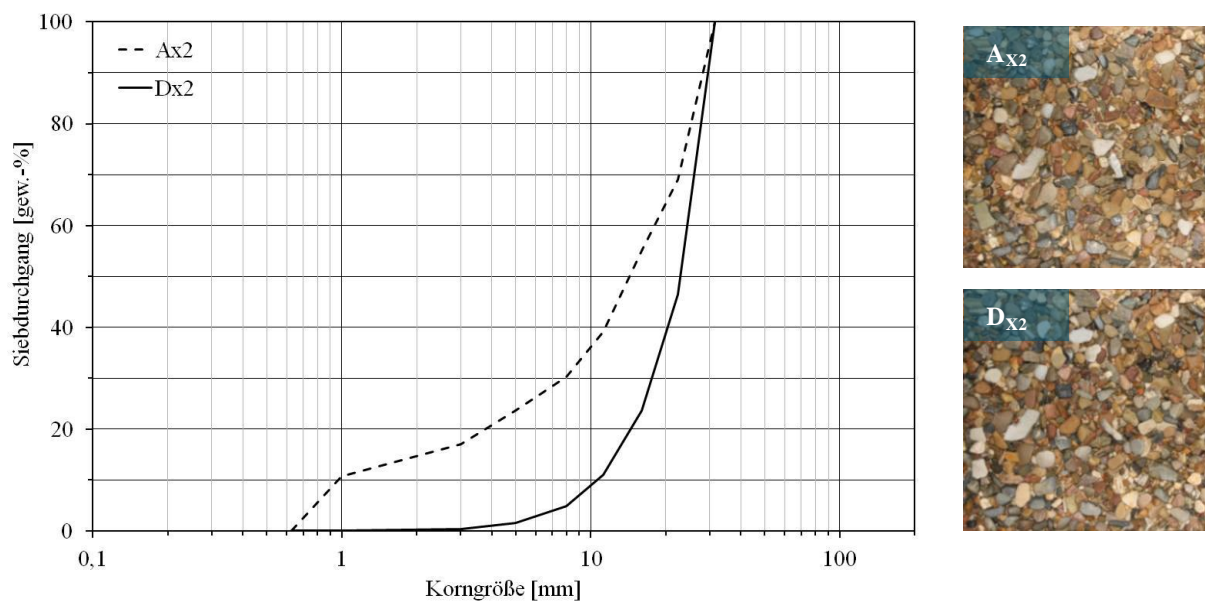


Abb. 6.7: Sieblinien und Sohlenfotografien der Ausgangsmischung A_{X2} und der Deckschicht D_{X2}

Die Deckschicht D_{X2} hat zwar ein kleineres Größtkorn als die Deckschicht Z_{X1} , weist aber den gleichen mittleren Korndurchmesser wie Z_{X1} ($d_{m,Z_{X1}} = 21,4$ mm) auf. Die Sohle hat eine insgesamt gröbere Struktur, was in dem erheblich geringeren Fein- und Mittelnkornanteil begründet ist. Dies äußert sich auch in einem größeren, freien Lückenraum zwischen den Kör-

nen der Sohlenoberfläche, der nach der Herstellung der Deckschicht D_{X2} visuell festgestellt wurde (Abb. 6.8).

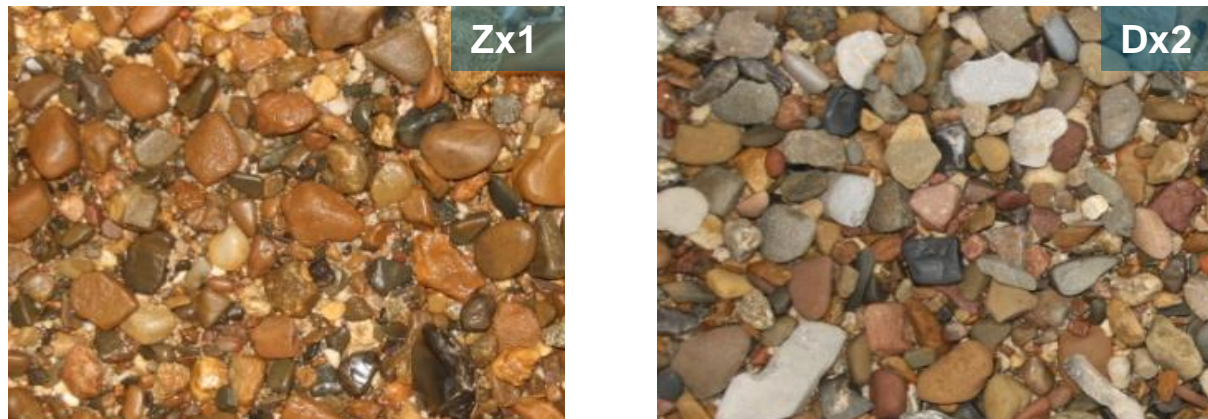


Abb. 6.8: Sohlenfotografien der Deckschichten Z_{X1} und D_{X2}

In der Deckschicht Z_{X1} sind sowohl die kleinen als auch die großen Korngrößen des Körnungsbereichs der Deckschicht signifikant vertreten. Auf der Sohlenfotografie von Z_{X1} ist zu erkennen, dass die Zwischenräume jeweils mit kleineren Kornanteilen, bis hin zum Sandanteil, verfüllt sind, so dass ein weitestgehend lückenloses Gefüge entsteht. Demgegenüber wird die Sohlenoberfläche der Deckschicht D_{X2} von den größeren Kornanteilen des verwendeten Körnungsbereichs dominiert. Die Räume zwischen diesen Körnern sind nur unvollständig mit kleineren Kornanteilen verfüllt. Der Sandkornanteil ist nahezu nicht vertreten. Das Vorherrschen einer Korngröße in der Zusammensetzung der Deckschicht kann ebenfalls anhand der geometrischen Standardabweichung der Sieblinie von D_{X2} festgestellt werden. Mit $\sigma_G = 1,5$ ist das Kriterium von Schöberl (1981) zur Unterscheidung zwischen einem Korngemisch und einem Einkornmaterial ($\sigma_G > 1,35$) nur knapp überschritten (vgl. Kap. 2.1.2). Die Sieblinie von Z_{X1} weist demgegenüber eine geometrische Standardabweichung von $\sigma_G = 2,0$ auf.

Die charakteristischen Korndurchmesser sowie die geometrische Standardabweichung σ_G , die kritische Sohlenschubspannung τ_{0c} und die Standardabweichung s der Ausgangsmischung A_{X2} und der Deckschicht D_{X2} sind in Tab. 6.2 zusammengefasst.

Tab. 6.2: Sedimentologische Parameter der Ausgangsmischung A_{X2} und der Deckschicht D_{X2}

Material	τ_{0c} [N/m ²]	d_m [mm]	d_{16} [mm]	d_{50} [mm]	d_{84} [mm]	d_{90} [mm]	d_{max} [mm]	σ_G [-]	s [mm]
A_{X2}	10,9	14,8	2,7	15,5	26,8	28,6	31,5	3,2	[-]
D_{X2}	13,5	21,4	13,1	23	28,8	29,8	31,5	1,5	7,3

Der Geschiebeaustrag nach Herstellung der statischen Deckschicht unterlag über der Zeit sehr großen Schwankungen im Bereich von 5 g/m·h bis 230 g/m·h. Der über einen Zeitraum von 8h gemittelte Geschiebeaustrag bei Klarwasserabfluss betrug $g_0 = 47$ g/m·h. Dies entspricht einer dimensionslosen Transportrate von $W^* = 0,00022$ und liegt damit weit unterhalb der Referenztransportrate von $W_r^* = 0,00218$ nach Parker & Klingeman (1982).

6.3.1.2 Ausgangsmischung A_{X3} und Deckschicht Z_{X3}

Die Sieblinie der Ausgangsmischung A_{X3} entsprach in ihrer Form der Sieblinie der Ausgangsmischung A_{X1} . Bezogen auf das Referenzmaterial aus der Natur wurde das Material jedoch im Maßstab 1:5 und nicht im Maßstab 1:3 skaliert. Daraus resultierte ein mittlerer Korndurchmesser von $d_m = 3,8$ mm und $d_{max} = 31,5$ mm, Abb. 6.9. Die Deckschicht Z_{X3} wurde mit einer entsprechenden Skalierung der Hydraulik für die Entwicklung von Z_{X1} hergestellt. Dies entsprach in der „Kleinen Rinne“ einem kritischen Abfluss der Deckschicht von $Q_{crit} = 28,9$ l/s mit einer Fließtiefe h von 0,13 m bei 0,5 % Wasserspiegellagengefälle. Die kritische Schubspannung der Deckschicht Z_{X3} betrug damit $\tau_{0c} = 6,4$ N/m². Der mittlere Korndurchmesser betrug $d_m = 13,4$ mm.

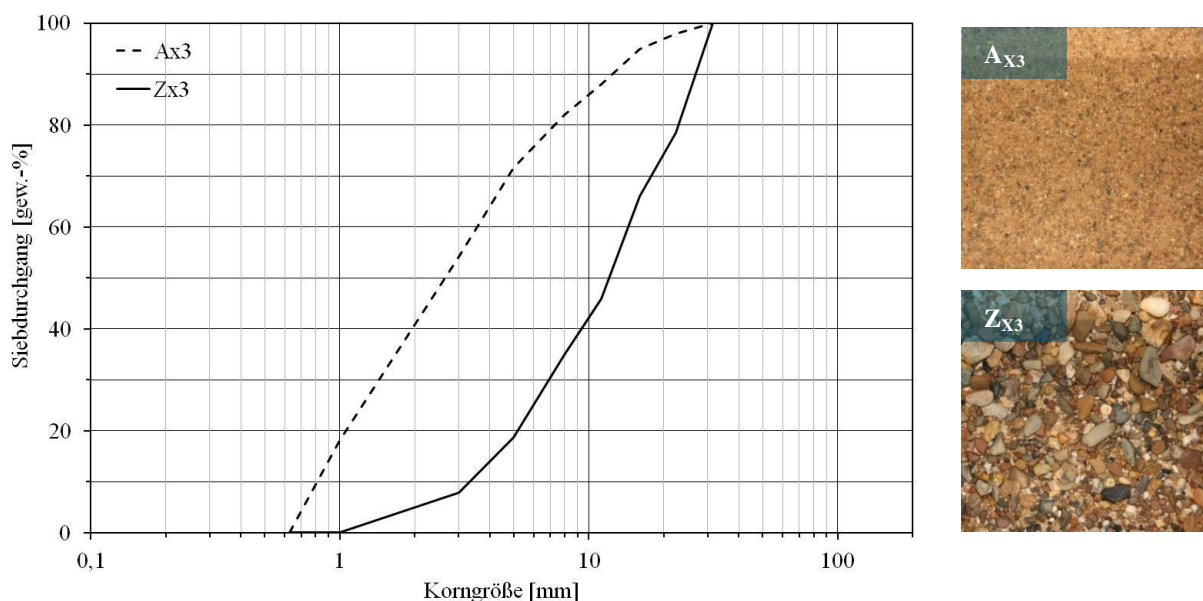


Abb. 6.9: Sieblinien und Sohlenfotografien der Ausgangsmischung A_{X3} und der Deckschicht Z_{X3}

Nach Abschluss der Deckschichtbildung wurde der mittlere Geschiebeaustrag aus der Deckschicht bei Klarwasserabfluss zu $g_0 = 154$ g/m·h bestimmt. Die dimensionslose Transportrate ergibt sich nach Gl. (2.15) damit zu 0,00069 (siehe Tab. 6.3).

Tab. 6.3: Sedimentologische Parameter der Ausgangsmischung A_{X3} und der Deckschicht Z_{X3}

Material	τ_{0c} [N/m ²]	d_m [mm]	d_{16} [mm]	d_{50} [mm]	d_{84} [mm]	d_{90} [mm]	d_{max} [mm]	σ_G [-]	s [mm]
A_{X3}	3,8	5,0	1,0	2,8	9,1	12,6	31,5	3,0	[-]
Z_{X3}	6,4	13,4	4,5	12,2	24,7	27,3	31,5	2,3	4,6

Die Standardabweichung (Tab. 6.3) wurde anhand von Längsprofilen ermittelt, die in der „Kleinen Rinne“ mit dem Ultraschallsensor aufgenommen wurden.

6.3.2 Tracer für die Geschiebezugabe

Für die Tracerversuche wurde das Zugabematerial in einzelne Kornfraktionen im Körnungsbereich von 1 bis 16 mm aufgeteilt. Diese waren: 1-3 mm, 3- 5 mm, 5- 8 mm, 8- 11 mm und 11- 16 mm. In Vorversuchen wurde der Bewegungsbeginn der einzelnen Kornfraktionen ermittelt und festgestellt, dass der Bewegungsbeginn gut durch den Shields-Parameters nach Meyer-Peter & Müller (1949) von $\tau_c^* = 0,047$ repräsentiert wird. Die einzelnen Kornfraktionen des Zugabematerials wurden zur Unterscheidung vom Sohlenmaterial farblich gekennzeichnet. In Tab. 6.4 sind die kritischen Schubspannungen des Tracers sowie deren Farbgebung zusammengestellt.

Tab. 6.4: Kritische Schubspannungen und Farbgebung der verwendeten Tracerfraktionen

Tracergröße		τ_{cT} [N/m ²]	Farbe
d_T [mm]	$d_{T,50}$ [mm]		
1-3	2,0	1,5	Magenta
3-5	4,0	3,0	Cyan
5-8	6,5	4,8	Magenta
8-11	9,5	7,1	Dunkelblau
11-16	13,5	10,0	Gelb
3-11	7,1	5,2	Cyan / Magenta / Grün

6.4 Versuchsdurchführung

Das Ziel der Laborversuche war es, den Ausbreitungsvorgang von externem Geschiebe auf statischen Deckschichten anhand einer Variation der Parameter, die in der Dimensionsanalyse in Kap. 5 als relevant identifiziert wurden, zu untersuchen. Im Folgenden werden der allgemeine Versuchsablauf und das Versuchsprogramm sowie das versuchsspezifische Messprogramm und die dazugehörigen Analyseverfahren erläutert.

6.4.1 Versuchsablauf

In den Tracerversuchen wurde farbig gekennzeichnete Geschiebetracer des Körnungsreichs von 1 bis 16 mm fraktionsweise (vgl. Abschnitt 6.3.2) über die statischen Deckschichten transportiert. Hierzu wurde der Tracer vor Versuchsbeginn in Form einer Barre auf der zuvor hergestellten statischen Deckschicht positioniert, vgl. Abb. 6.10.

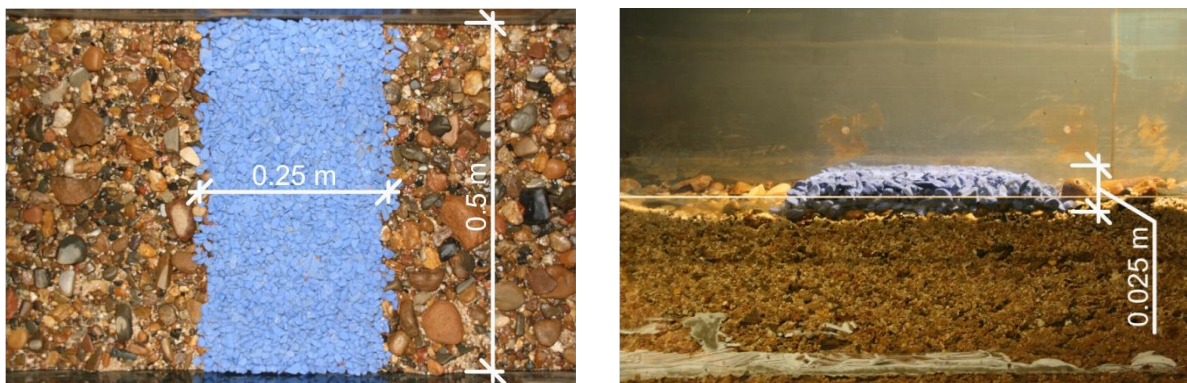


Abb. 6.10: Tracerbarre auf der statischen Deckschicht Z_{X1} in der hydraulischen Kipprinne

Die Dimensionen der Tracerbarre wurden anhand von Vorversuchen festgelegt, in denen der Einfluss von Form und Größe der Barre auf den Abtransport des Tracers, die Hydraulik und die lokale Stabilität der Deckschicht am Zugabeort untersucht wurde. Für die Versuche in der hydraulischen Kipprinne hatte die Tracerbarre jeweils eine Länge von 25 cm, eine Breite von 50 cm und eine Höhe von 2,5 cm. Der Schwerpunkt der Tracerbarre befand sich in allen Versuchen bei Rinnenposition 7,5 m, d.h. 7,5 m unterstrom des Rinnenzulaufes und 9,8 m oberhalb des Sedimentfangkorbes. Für die Versuche in der „Kleinen Rinne“ wurde die Größe Tracerbarre abhängig von der Zugabemenge variiert (vgl. Tab. 6.6). In diesen Versuchen wurde die Position der Front der Tracerbarre konstant gehalten, so dass für die Untersuchung der Transportvorgänge jeweils 3,35 m Sohle zur Verfügung standen.

Die erste Ausbreitung der Tracerbarre erfolgte nach der Platzierung des Tracers auf der Deckschicht stets mit 80 % des kritischen Abflusses. Dies diente der Vermeidung lokaler Erosi-

onsprozesse am Zugabeort infolge der durch die Tracerbarre veränderten Hydraulik. Der spezifische Versuchsdurchfluss Q_{exp} wurde nach einer Versuchsdauer von 15 min eingestellt und bis zum Versuchsende konstant gehalten.

Die Tracerversuche dauerten so lange an, bis visuell keine weitere Bewegung des Tracers auf der Sohle mehr festzustellen war. Die maximale Versuchszeit betrug 930 min.

6.4.2 Messprogramm und Auswertemethodik

Während der Versuche wurden die Tracerverteilung auf der Sohlenoberfläche, der Sedimentaustrag und die Wasserspiegellage bestimmt. Für die Bestimmung der Tracerverteilung wurden die Versuche unterbrochen und das Wasser aus den Versuchsrinnen abgelassen, um orthogonale Fotografien der Sohlenoberfläche anzufertigen. Dies erfolgte zu den Zeitschritten $t = 15, 30, 60, 90, 150, 210, 330, 450, 690, 930$ min. Anhand der Sohlenfotografien wurde mit Hilfe der in Kap. 6.2 beschriebenen Bildanalyse für jeden Versuch zu jedem Zeitschritt die Ausbreitung des Tracers auf der jeweiligen Deckschicht bestimmt und daraus die Verteilung des Tracers im Längsschnitt (Längsverteilung) ermittelt. Abb. 6.11 zeigt exemplarisch die ermittelten Längsverteilungen nach den Zeitschritten 30, 150 und 690 min für einen Versuch mit $Q_{exp} = 80$ l/s ($\tau_0 = 9,3$ N/m²) mit einer Tracergröße von 3-5 mm auf der Deckschicht Z_{X1} .

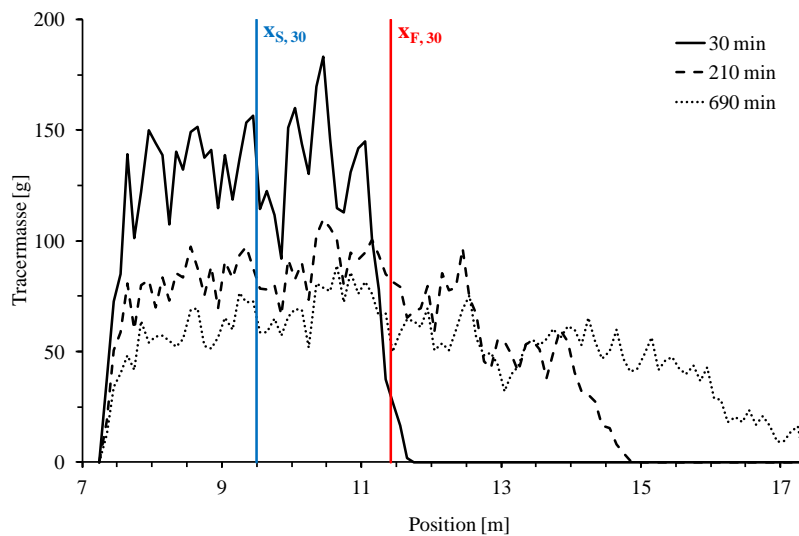


Abb. 6.11: Längsverteilung des Tracers auf der Deckschicht mit $d_T = 3-5$ mm, Z_{X1} und $Q_{exp} = 80$ l/s, $X_{S,30}$ = Position des Schwerpunktes und $X_{F,30}$ = Position der Front nach jeweils 30 min Versuchsdauer

Aus den ermittelten Verteilungen kann jeweils die Position des Schwerpunkts der Tracerwolke X_S und die Tracerfront X_F bestimmt werden. Der Schwerpunkt der Tracerwolke wird dabei als mittlere Transportweite interpretiert. Die Tracerfront ist entsprechend der Definition von

Promny (2008a) die Rinnenposition, die von 99 % des Tracers noch nicht überschritten wurde. Durch die Ermittlung von Front- und Schwerpunktposition für jeden Zeitschritt ist der zeitliche Verlauf der Transportweiten der Tracerfront L_F und des Tracerschwerpunkts L_S bekannt. Die Transportweiten werden auf die Zugabeposition bezogen. Aus den Transportweiten können auch die Frontgeschwindigkeit $u_{T,F}$ und die mittlere Transportgeschwindigkeit $u_{T,S}$ berechnet werden. Bei der Bestimmung der Transportgeschwindigkeiten können dabei zwei verschiedene Vorgehensweisen unterschieden werden. Die erste Methode ist die Berechnung der Geschwindigkeiten u_T für die Zeit- (Δt) und die Transportweitendifferenz (ΔL) zwischen zwei Messereignissen. Bei der zweiten Möglichkeit werden die Geschwindigkeiten der Tracer \bar{u}_T aus den Transportweiten L ab dem Zugabeort und der Versuchsdauer t ab Versuchsbeginn berechnet. Eine weitere Größe, die aus den Tracerverteilungen ermittelt wird, ist die mittlere Konzentration der Tracer auf der Sohle. Das Maß hierfür ist der Anteil der Fläche zwischen der Zugabeposition und der Tracerfront, die von dem Tracer überdeckt wird, und wird als Flächenkonzentration C_A bezeichnet. Die Flächenkonzentration wurde gewählt, da weder eine sinnvolle Bestimmung des Deckschichtvolumens noch der Deckschichtmasse möglich ist. In Tab. 6.5 sind Definitionen der Parameter, die aus den Tracerverteilungen bestimmt werden, zusammengefasst.

Tab. 6.5: Definition der aus den Tracerverteilungen bestimmten Parameter

Parameter	Definition
X_F [m]	Auf den Rinnenanfang bezogene Position der Tracerfront
X_S [m]	Auf den Rinnenanfang bezogene Position des Tracerschwerpunkts
L_F [m]	Transportweite der Tracerfront; Abstand zwischen der Tracerfront und der Zugabeposition des Tracers
L_S [m]	Transportweite des Tracerschwerpunkts; Abstand zwischen dem Tracerschwerpunkt und der Zugabeposition des Tracers
u_T [m/h]	Mit der Transportweiten- (ΔL) und Zeitdifferenz (Δt) zwischen zwei Messereignissen bestimmte Transportgeschwindigkeit
\bar{u}_T [m/h]	Mit der Transportweite- (L) und Versuchsdauer (t) ab Versuchsbeginn bestimmte Transportgeschwindigkeit
$u_{T,F}$ [m/h]	Transportgeschwindigkeit der Tracerfront
$u_{T,S}$ [m/h]	Transportgeschwindigkeit des Tracerschwerpunkts bzw. mittlere Transportgeschwindigkeit der Tracer
C_A [m ² /m ²]	Flächenkonzentration des Tracers auf der Sohlenoberfläche zwischen Zugabeort und Tracerfront; Anteil der mit Tracer überdeckten Fläche

Für die Datenanalyse wurde auf beiden Längsseiten der Versuchssohle ein Randstreifen von jeweils 5 cm von der Auswertung ausgenommen. Hierdurch konnte die Verfälschung der Versuchsergebnisse durch Wandeinflüsse oder Strömungsschatten von großen Körnern, die direkt an der Rinnenwandung liegen, ausgeschlossen werden. Für die hydraulische Kipprinne erfolgte die Auswertung der Transportweiten also für die mittleren 40 cm und für die „Kleine Rinne“ für die mittleren 20 cm der jeweiligen Deckschicht.

Der Sedimentaustrag wurde für die ersten beiden Zeitschritte nach Ablauf der Zeitspanne von 15 min und im weiteren Versuchsablauf alle 30 min bestimmt und hinsichtlich seines Gewichtes und seiner Herkunft (Sohlen- bzw. Tracermaterial) analysiert.

6.4.3 Versuchsprogramm

Mit den Tracerversuchen sollten die Parameter Strömungsangriff, Korngröße des Tracers, Oberflächenstruktur der Deckschicht und Tracermenge hinsichtlich ihres Einflusses auf den Transport einer limitierten Geschiebemenge sowie der zeitliche Verlauf des Ausbreitungsvorgangs untersucht werden. Hierzu wurden die Sohlenschubspannung τ_0 , die Korngröße des Tracers d_T , die Tracermasse M_T sowie die statische Deckschicht (Z_{X1} , D_{X2} , Z_{X3}) variiert. Anhand der verwendeten Deckschichten lassen sich die Versuche in drei Versuchsgruppen unterteilen:

1. Deckschicht Z_{X1}

In den Versuchen mit Deckschicht Z_{X1} ($Q_{crit,ZX1} = 100 \text{ l/s}$) wurde die Tracergröße im Bereich von $d_T = 1\text{-}3 \text{ mm}$ bis $11\text{-}16 \text{ mm}$ variiert und der Transport bei zwei unterschiedliche Sohlenschubspannungen von $\tau_0 = 9,3 \text{ N/m}^2$ ($Q_{exp} = 80 \text{ l/s}$) und $\tau_0 = 10,7 \text{ N/m}^2$ ($Q_{exp} = 100 \text{ l/s} = Q_{crit,Zx}$) beobachtet. Das Volumen des Tracers wurde konstant gehalten, die Tracermasse variierte je nach Korngröße zwischen 4800 und 5300 g. Die Versuche wurden in der hydraulischen Kipprinne durchgeführt.

2. Deckschicht D_{X2}

Die Versuche auf der Deckschicht D_{X2} wurden in der hydraulischen Kipprinne mit einer Sohlenschubspannung von $\tau_0 = 13,5 \text{ N/m}^2$ ($Q_{exp} = 120 \text{ l/s} = Q_{crit,Dx}$) durchgeführt. Die Variation der Tracergröße fand im Bereich von $d_T = 3\text{-}5 \text{ mm}$ bis $8\text{-}11 \text{ mm}$ statt. Das Volumen des Tracers wurde konstant gehalten. Anhand eines Zusatzversuchs wurde das Transportverhalten eines Kiesgemischs ($d_T = 3\text{-}11 \text{ mm}$) untersucht.

3. Deckschicht Z_{X3}

Zur Bestimmung des Einflusses der Tracermenge wurde die Tracermasse M_T variiert. Die Tracergröße betrug in allen Versuchen $d_T = 3\text{-}5\text{ mm}$ und der Transport erfolgte bei $\tau_0 = 6,4\text{ N/m}^2$ ($Q_{exp} = 28,9\text{ l/s} = Q_{crit,Zx}$). Das Volumen der Tracerbarre variierte entsprechend der zugegebenen Tracermasse. Die Versuche wurden in der „Kleinen Rinne“ durchgeführt.

In Tabelle 6.6 sind die durchgeführten Versuche mit den jeweils maßgeblichen Versuchsparametern zusammengefasst.

Tab. 6.6: Parameter der Tracerversuche

Versuch	Rinne	Deckschicht	Tracerbarre			τ_{0c} [l/s]	τ_0 [N/m ²]
			$l \cdot b \cdot h$ [cm ³]	M_T [kg]	d_T [mm]		
H01	Hydraulische Kipp Rinne	Z_{X1}	$25 \cdot 50 \cdot 2,5$	5,3	1-3	10,7	9,3
H02				5,2	3-5		
H03				5	5-8		
H04				4,8	8-11		
H05				5,2	3-5		
H06				5	5-8		
H07		Z_{X1}	$25 \cdot 50 \cdot 2,5$	5,2	3-5	10,7	10,7
H08				5	5-8		
H09				4,8	8-11		
H10				4,8	11-16		
H11		D_{X2}	$25 \cdot 50 \cdot 2,5$	5,2	3-5	13,5	13,5
H12				5	5-8		
H13				4,8	8-11		
H14				5,25	3-11		
K01	Kleine Rinne	Z_{X3}	$15 \cdot 30 \cdot 1,5$	1,1	3-5	6,4	6,4
K02			$25 \cdot 30 \cdot 1,5$	2,0			
K03			$30 \cdot 30 \cdot 1,5$	2,2			
K04			$45 \cdot 30 \cdot 1,5$	3,3			
K05			$60 \cdot 30 \cdot 1,5$	4,4			
K06			$15 \cdot 30 \cdot 1,5$	1,1			

6.4.4 Reproduzierbarkeit der Ergebnisse

Anhand von Wiederholungsversuchen wurde die Reproduzierbarkeit der Experimente überprüft. In Abb. 6.12 sind die Ergebnisse zu den mittleren Transportgeschwindigkeiten u_T von Tracerversuchen mit $\tau_0 = 9,3 \text{ N/m}^2$ und den Tracergrößen 3-8 mm und 5-8 mm in einer log/log-Auftragung dargestellt. Es werden jeweils zwei getrennte Versuchsdurchläufe gezeigt. Um die vollständige Unabhängigkeit der Wiederholungsversuche zu gewährleisten wurde vor ihrer Durchführung ebenfalls die Deckschicht Z_{X1} erneut hergestellt.

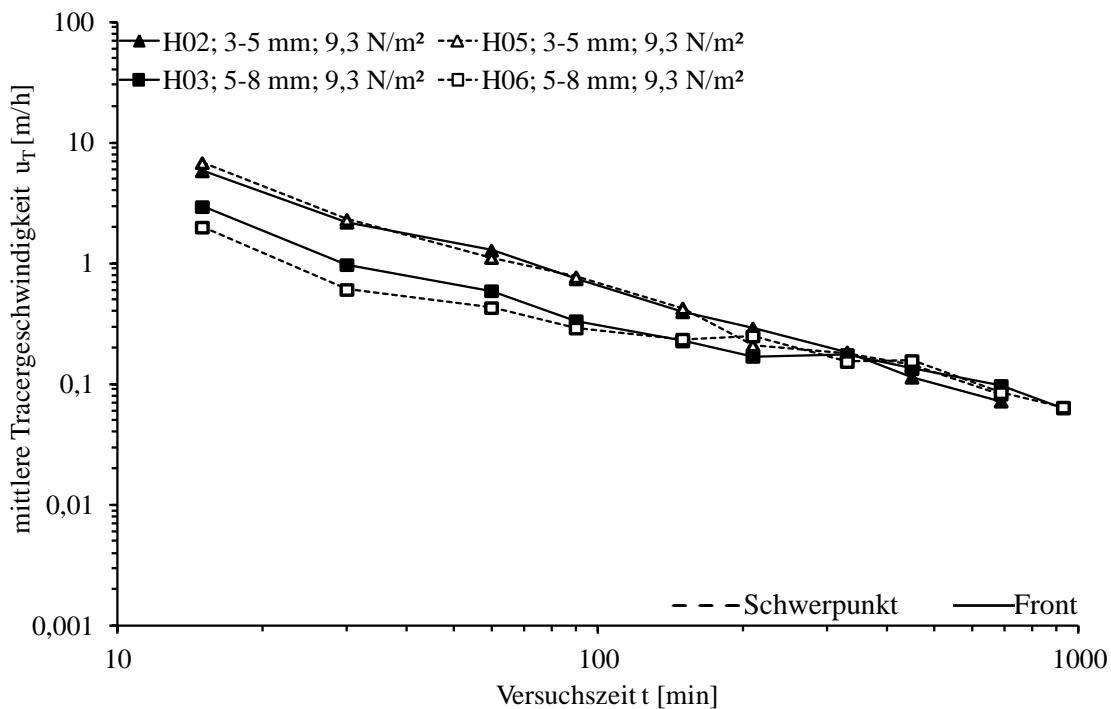


Abb. 6.12: Wiederholung der Tracerversuche mit Z_{X1} und $d_T = 3-5 \text{ mm}$ (H02 und H05) sowie $d_T = 5-8 \text{ mm}$ und $\tau_0 = 9,3 \text{ N/m}^2$ (H03 und H06)

Insgesamt liegt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen dem Erstversuch und dem Wiederholungsversuch vor. Dennoch unterliegen die Transportgeschwindigkeiten gewissen Fluktuationen, die bei dem größeren Material, das eine geringere Mobilität aufweist, höher ausfallen. Die Ursache für die Fluktuationen ist in der stochastischen Natur von Geschiebetransportprozessen und der Deckschichtbildung zu suchen. Auch wenn die erneut hergestellte Sohle die gleiche Sieblinie hat, so kann dennoch durch eine veränderte Anordnung der Körner lokal betrachtet eine veränderte Sohlenstruktur auftreten. Dies kann zu einer lokal abweichenden Exponiertheit einzelner Körner und damit zu einem veränderten Bewegungsbeginn führen, vgl. Abschnitt 2.1.2. Diese Faktoren sind bei der Verwendung einer natürlich gebildeten Deckschicht nicht beeinflussbar. Im Rahmen der naturgegebenen Abweichungen zeigt sich allerdings eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Versuche.

6.5 Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse der Versuche werden entsprechend ihrer Einteilung in Abschnitt 6.4.3 in die Experimente mit den Deckschichten Z_{X1} , D_{X2} , und Z_{X3} unterteilt. Sie werden hinsichtlich der Entwicklung der Ausbreitung einer limitierten Geschiebemenge über die Versuchszeit und der Auswirkungen der variierten Versuchsparameter (Korngröße des Tracers d_T , Schubspannung τ_0 , Oberflächenstruktur der Deckschicht $d_{50,S}$ und Tracermasse M_T) analysiert. Die Charakterisierung der Ausbreitung erfolgt dabei durch die mittlere Transportgeschwindigkeit der Tracer und die Geschwindigkeit der Tracerfront bzw. durch das Verhältnis der Transportweiten von Front und Schwerpunkt (L_F / L_S) zu einem Versuchszeitpunkt t .

Im Rahmen der Experimente wurden, zusätzlich zu dem Fokus dieser Arbeit, Daten über das Stabilitätsverhalten einer Deckschicht bei einem darauf stattfindenden Geschiebetransport erfasst. Diese Ergebnisse werden in Abschnitt 6.5.4 vorgestellt. In Kap. 6.5.5 werden die Ergebnisse der Versuche zusammenfassend diskutiert. Die Analyse des funktionalen Zusammenhangs der variierten Einflussgrößen erfolgt in Kap. 7 mit Hilfe der in Kap. 5 ermittelten dimensionslosen Parameter.

6.5.1 Transport über Z_{X1} ($d_m = 21,6 \text{ mm}$, $\tau_{0c} = 10,7 \text{ N/m}^2$)

Mit der Deckschicht Z_{X1} wurden in der hydraulischen Kipprinne insgesamt sechs Versuche mit einer Sohlschubspannung von $\tau_0 = 9,3 \text{ N/m}^2$ ($Q_{exp} = 80 \text{ l/s}$, $h = 0,19 \text{ m}$) und 4 Versuche mit einer Schubspannung von $\tau_0 = 10,7 \text{ N/m}^2$ ($Q_{exp} = 100 \text{ l/s}$, $h = 0,22 \text{ m}$) durchgeführt (siehe Tab. 6.6). Die kritische Schubspannung der Deckschicht betrug $\tau_{cD} = 10,7 \text{ N/m}^2$. Die Experimente erfolgten mit den Tracerfraktionen 1-3 mm, 3-5 mm, 5-8 mm, 8-11 mm und 11-16 mm bei konstanter Größe der Tracerbarren von $b_T = 0,5 \text{ m} \cdot l_T = 0,25 \text{ m} \cdot h_t = 0,025 \text{ m}$. Die Laufzeit betrug im Allgemeinen $t = 930 \text{ min}$. Abweichend davon wurden die Versuche H04 ($d_T = 8-11 \text{ mm}$, $\tau_0 = 9,3 \text{ N/m}^2$) und H09 ($d_T = 11-16 \text{ mm}$, $\tau_0 = 10,7 \text{ N/m}^2$) nach 90 min bzw. 270 min abgebrochen, da visuell keine Bewegung des Tracers mehr zu erkennen war. Infolge der nur unvollständigen Ausbreitung der Tracerbarre trat ein veränderter Sohlenangriff am Zugabeort auf, der zu einer lokalen Erosion der Deckschicht führte.

6.5.1.1 Tracerversuche über Z_{X1} , $\tau_0 = 9,3 \text{ N/m}^2$

Die Experimente mit der Deckschicht Z_{X1} und $\tau_0 = 9,3 \text{ N/m}^2$ wurden mit den Tracerfraktionen $d_T = 1-3, 3-5, 5-8$ und $8-11 \text{ mm}$ durchgeführt. In Abb. 6.13 sind für diese Versuche die Verläufe der Transportweiten der Front und des Schwerpunkts der Tracerverteilungen als Summen-

linie dargestellt. Auf der x-Achse ist die Versuchszeit t angetragen. Die y-Achse zeigt die zurückgelegten Transportweiten L zu dem Zeitpunkt t als Abstand zu der Zugabeposition der Tracerbarre. Die Front der gemessenen Verteilung bezieht sich dabei auf die Front der Tracerbarre und der Schwerpunkt auf den Schwerpunkt der Tracerbarre. Die Versuchsergebnisse sind zusätzlich in Tabellenform in Anhang A.1 zusammengefasst.

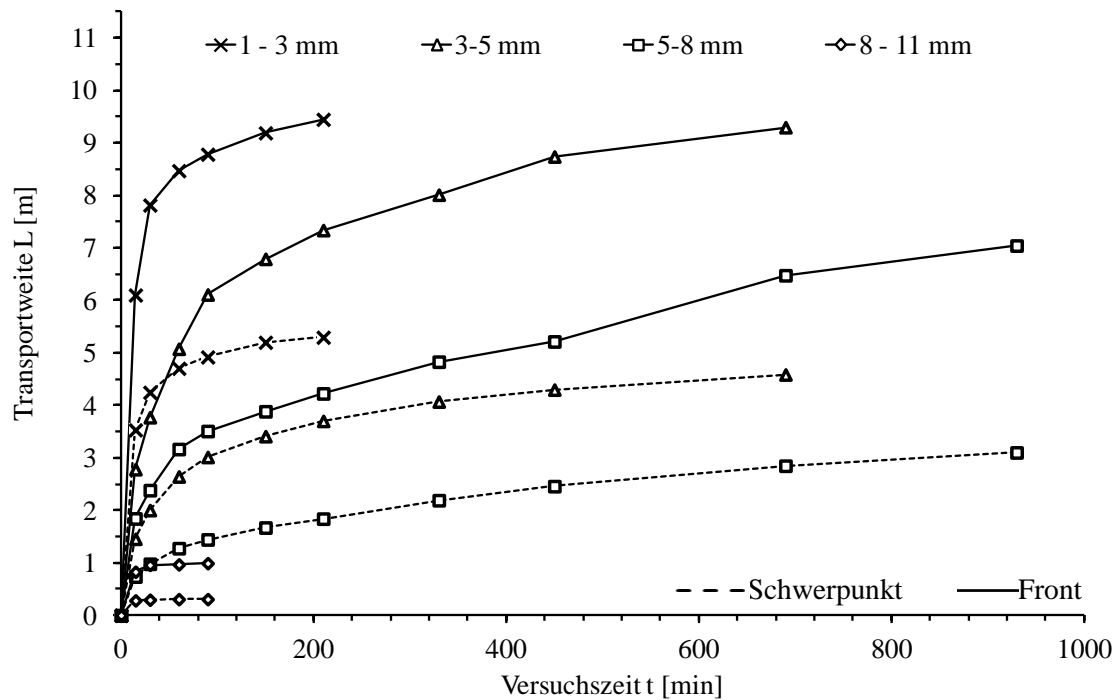


Abb. 6.13: Transportweite von Tracerfront und -schwerpunkt über Z_{X1} bei $\tau_0 = 9,3 \text{ N/m}^2$

Die Transportweiten weisen unabhängig von der Korngröße des Tracers einen asymptotischen Verlauf auf. Mit fortschreitender Versuchszeit nimmt also die Steigung der Kurven ab und der Transport der Tracer kommt praktisch zum Erliegen. Es zeigt sich weiterhin, dass sowohl die Tracerfronten als auch die Tracerschwerpunkte nach der gleichen Versuchszeit bei kleinerem Tracer deutlich weiter fortgeschritten sind als bei größerem Tracer. Die Tracerfront erreicht bei $d_T = 1-3 \text{ mm}$ nach einer Versuchszeit von 210 min eine Transportweite von $L_F = 9,45 \text{ m}$. Im Vergleich dazu beträgt zu diesem Zeitpunkt die Transportweite der Front bei gleichen hydraulischen Randbedingungen mit $d_T = 3-5 \text{ mm}$ 7,34 m und bei $d_T = 5-8 \text{ mm}$ ca. 4,24 m. Der Transport der Tracerfraktion $d_T = 8-11 \text{ mm}$ kommt bereits nach 90 min bei einer Transportweite von $L_F = 0,99 \text{ m}$ nahezu zum Erliegen. Die Transportweiten des Tracerschwerpunkts (mittlere Transportweite) L_S betragen jeweils zu den gleichen Messzeitpunkten etwa 30 - 50 % der Transportweite der Tracerfront L_F . In Abb. 6.14 sind die Verhältnisse der Transportweiten von Front und Schwerpunkt als Funktion der mittleren Korngröße $d_{T,50}$ der Tracer dargestellt. Das Verhältnis der Transportweiten L_F/L_S wird dabei, entsprechend der Auslegung

von Gölz & Trompeter (2001), als Maß für den Grad der Dispersion interpretiert (vgl. Kap. 3.2.2.2).

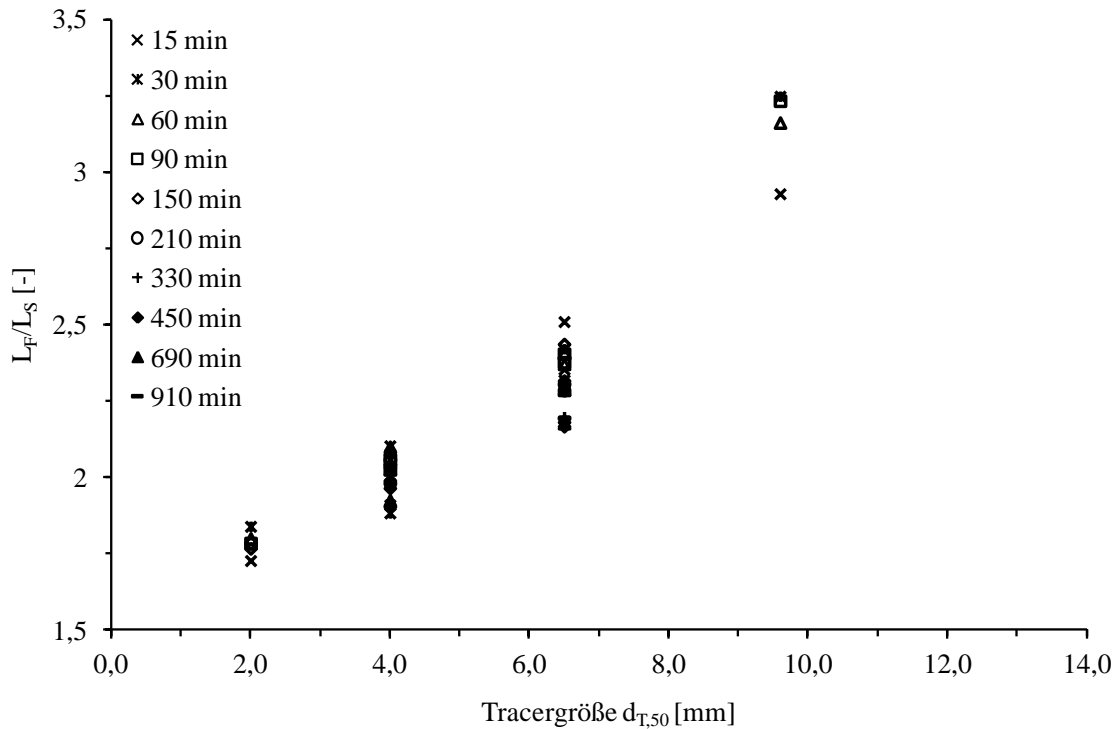


Abb. 6.14: Verhältnis der Transportweiten der Tracerfront L_F und des Schwerpunkts L_S als Funktion der mittleren Korngröße der Tracer $d_{T,50}$ über Z_{X1} bei $\tau_0 = 9,3 \text{ N/m}^2$

Das Verhältnis L_F/L_S , und damit auch die Dispersion des Tracers wird mit zunehmendem Korndurchmesser größer. Weiterhin nimmt mit größer werdendem Korndurchmesser auch die zeitliche Schwankungsbreite zu. Der kleinste Mittelwert von L_F/L_S , der ebenfalls den kleinsten Schwankungsbereich aufweist, ergibt sich für den Tracer 1-3 mm zu $L_F/L_S = 1,78$ mit einem Minimum von 1,73 und einem Maximum von 1,84. Der größte Wert ergibt sich für $d_T = 8\text{-}11 \text{ mm}$ mit einem Mittelwert von $L_F/L_S = 3,14$ (Min.: 2,93; Max.: 3,25). Die Zahlenwerte bedeuten, dass die Tracerfront zu dem Zeitpunkt t im Mittel 1,73- bzw. 3,14-mal weiter fortgeschritten war als der Schwerpunkt. In Tab. 6.7 sind die Mittelwerte sowie die Maxima und Minima der ermittelten Verhältnisse der Transportweiten zusammengestellt. Der Grad der Dispersion, d.h. das Ausbreitungsverhalten hängt also eindeutig von der Korngröße der Tracer ab. Da die angreifende Schubspannung ($\tau_0 = 9,3 \text{ N/m}^2$) in den einzelnen Versuchen konstant war, sind die Schwankungen auf die mit der Korngröße abnehmende Mobilität zurückzuführen (siehe auch Koll et al., 2010). Ein Zusammenhang des Grads der Dispersion mit der Versuchszeit ist nicht ersichtlich.

Tab. 6.7: Verhältnis der Transportweiten der Tracerfront L_F und des Schwerpunkts L_S für die verschiedenen Tracerfraktionen über Z_{X1} bei $\tau_0 = 9,3 \text{ N/m}^2$

		Tracerfraktion			
		1-3 mm	3-5 mm	5-8 mm	8-11 mm
L_F/L_S	Mittelwert	1,78	2,0	2,31	3,14
	Minimum	1,73	1,88	2,17	1,93
	Maximum	1,84	2,10	2,51	3,25

Aus den in Abb. 6.13 gezeigten Transportweiten können die Transportgeschwindigkeiten der Tracer berechnet werden. Hierfür können zum einen die Zeitspanne Δt und die Transportweitedifferenz ΔL zwischen zwei Messereignissen und zum anderen die Transportweite L und die Versuchsdauer t ab Versuchsbeginn verwendet werden (vgl. Kap. 6.4.2). Erstere Methode gibt den Verlauf der Transportgeschwindigkeiten genauer wieder, weist aber starke Schwankungen auf. In Abb. 6.15 sind die für die Zeitabschnitte berechneten Geschwindigkeiten u_T von Tracerfront und -schwerpunkt über der Versuchszeit t in einer log/log-Auftragung dargestellt.

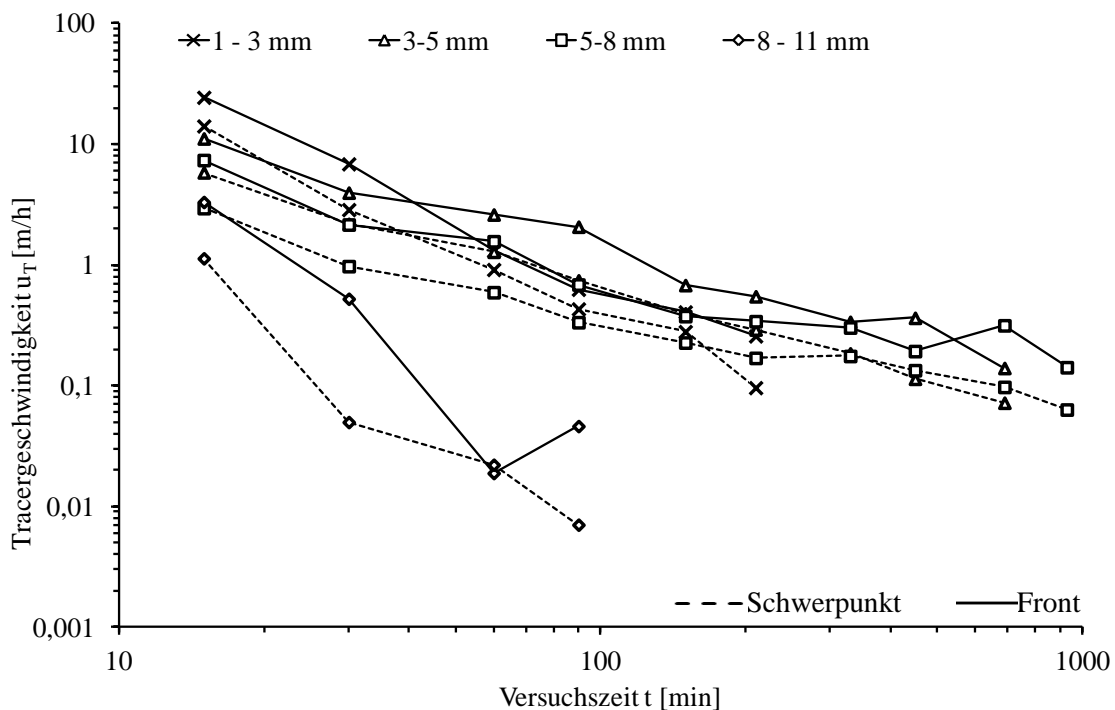


Abb. 6.15: Front- und Schwerpunktgeschwindigkeit der Tracer über Z_{X1} bei $\tau_0 = 9,3 \text{ N/m}^2$

Die kleineren Korngrößen werden insgesamt schneller transportiert als die größeren. Beispielsweise betragen die Frontgeschwindigkeiten der Tracer zu Versuchsbeginn

$u_{T,F,1-3\text{ mm}} = 24,4\text{ m/h}$, $u_{T,F,3-5\text{ mm}} = 11,1\text{ m/h}$, $u_{T,F,5-8\text{ mm}} = 7,4\text{ m/h}$ und $u_{T,F,8-11\text{ mm}} = 3,3\text{ m/h}$ und sind im Mittel etwa doppelt so hoch wie die Schwerpunktgeschwindigkeiten. Weiterhin nehmen die Transportgeschwindigkeiten entsprechend der Abnahme der Differenzen der Transportweiten umgekehrt proportional zu der Versuchsdauer t stark ab. Am Beispiel des Versuchs für die Tracerfraktion 3-5 mm bedeutet dies, dass die nach 15 min Versuchszeit ermittelte Frontgeschwindigkeit etwa 11,1 m/h beträgt. Nach 60 min Versuchszeit ist diese bereits auf 2,1 m/h und nach 210 min auf 0,6 m/h abgefallen. Der Grad der Geschwindigkeitsabnahme ist hierbei für die Fraktion 1-3 mm am höchsten. Bereits nach 60 min Versuchsdauer wurden mit $u_{T,F} = 1,31\text{ m/h}$ die Transportgeschwindigkeiten der nächst größeren Tracerfraktion ($d_T = 3-5\text{ mm}$) unterschritten. Nach Versuchsende wurde festgestellt, dass die Tracerkörner mit ($d_T = 1-3\text{ mm}$) zum Teil bis zu 50 mm tief in die Sohle eingebaut waren. Im Gegensatz dazu wurde für die größeren Kornfraktionen keine signifikante Einmischung in das Sohlenmaterial festgestellt. Das Eindringen des Tracers in die Sohle war nicht auf eine Bewegung des Sohlenmaterials, sondern auf ein Eindringen in den Porenraum der Deckschicht zurückzuführen. Eine weitere Ausnahme im Transportverhalten bildet der Tracer $d_T = 8-11\text{ mm}$. Nach 60 min sind die Transportgeschwindigkeiten von Front und Schwerpunkt gleich. Nach 90 min wurde jedoch eine Frontgeschwindigkeit ermittelt, die etwa das 5-fache der Schwerpunktgeschwindigkeit betrug. Zu diesen Zeitpunkten wurden nur noch sehr niedrige mittlere Geschwindigkeiten festgestellt, die bereits unterhalb der Messgenauigkeit lagen.

Eine höhere Geschwindigkeit der Tracerfront als die des Schwerpunkts bedeutet, dass die Ausdehnung der Tracerverteilung mit der Zeit immer größer wird, was unmittelbar mit einer Abnahme der lokalen Tracerkonzentration auf der Deckschicht und einer Reduzierung der Tracergeschwindigkeit einhergeht. Als Maß für die Tracerkonzentration wird die mittlere Flächenkonzentration C_A berechnet (vgl. Kap. 6.4.2). In Abb. 6.16 ist für die verschiedenen Tracerfraktionen die mittlere Transportgeschwindigkeit über die Flächenkonzentration zu Beginn des jeweiligen Zeitabschnitts in einer log/log Skalierung aufgetragen. Die Transportgeschwindigkeit weist einen direkten Zusammenhang mit der Flächenkonzentration der Tracer auf. Je höher die Flächenkonzentration ist, desto höher ist die Transportgeschwindigkeit. Mit stark abnehmender Mobilität, wie bei der Fraktion 8-11 mm zeigt sich ein anderer Zusammenhang der Transportgeschwindigkeit mit der Flächenkonzentration als bei den übrigen Tracerfraktionen. Die Geschwindigkeit der Tracer nimmt deutlich schneller ab. Dies weist darauf hin, dass infolge der Ausbreitung und der Einlagerung in die Sohlenoberfläche die kritische Schubspannung der Tracer soweit zugenommen hat, dass der Bewegungsbeginn nicht mehr bzw. kaum noch überschritten wird.

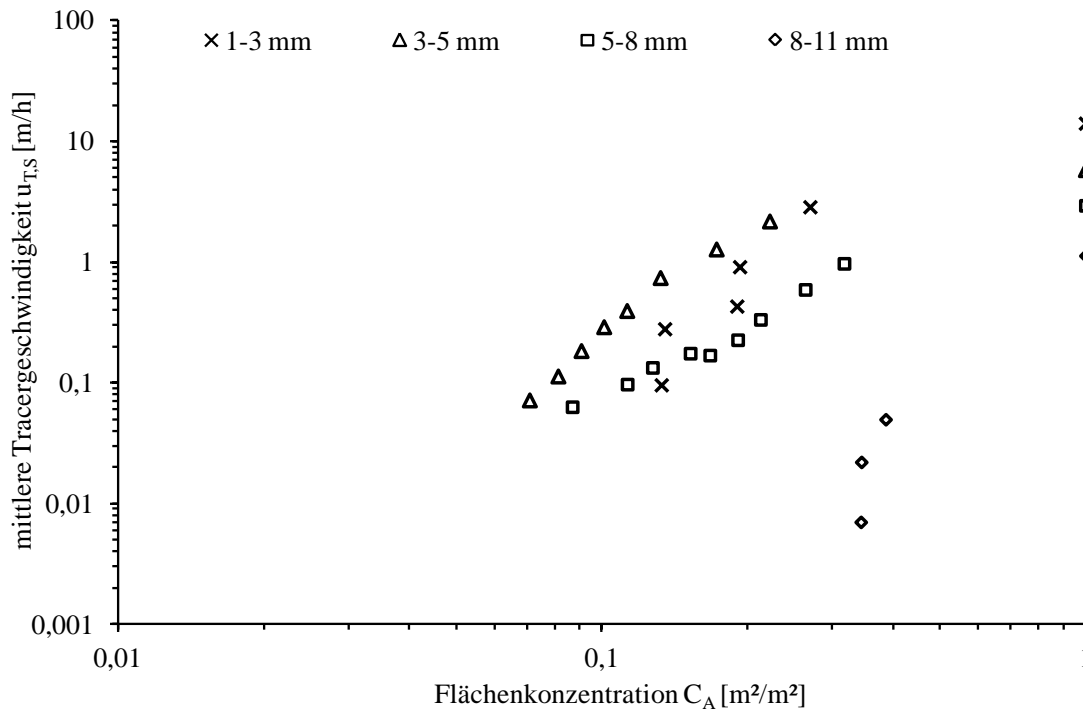


Abb. 6.16: Schwerpunktgeschwindigkeit $u_{T,S}$ in Abhängigkeit von der Flächenkonzentration der Tracer über Z_{X1} bei $\tau_0 = 9,3 \text{ N/m}^2$

Die bisher beschriebenen Transportgeschwindigkeiten wurden für jeden Zeitraum zwischen zwei Messzeitpunkten ermittelt. Bei der Betrachtung der Geschwindigkeiten \bar{u}_T , die aus der Tracerposition relativ zur Zugabestelle und der Versuchsdauer berechnet wurden, ist der Verlauf der Geschwindigkeitsabnahme über die Versuchszeit deutlich geglättet, (Abb. 6.17). Es zeigt sich wiederum, dass die Tracergeschwindigkeiten für die kleineren Kornfraktionen höher sind als für die größeren Tracer. Die hohen Transportgeschwindigkeiten in den ersten 30 Minuten bewirken, dass für den gesamten Versuchsverlauf höhere Geschwindigkeiten ermittelt werden als bei der Berechnung der Geschwindigkeiten zwischen zwei Messzeitpunkten. Dementsprechend ist das Gefälle der Kurven deutlich geringer als bei den Geschwindigkeiten u_T für die Zeitabschnitte. Die Dominanz der anfänglichen Transportgeschwindigkeit kann insbesondere an dem Kurvenverlauf für die Tracerfraktion 1-3 mm erkannt werden. Im Gegensatz zu den in Abb. 6.14 gezeigten Geschwindigkeiten werden die Front- bzw. Schwerpunktgeschwindigkeit der Fraktion 3-5 mm über die gesamte Versuchsdauer hinweg nicht unterschritten. Mit dieser Form der Darstellung lässt sich zwar direkt die Transportweite L nach einer Zeit t bestimmen, der zeitliche Verlauf zum Erreichen der Transportweite lässt sich allerdings nur indirekt durch die Rückrechnung in die Geschwindigkeiten zwischen zwei Messzeitpunkten ermitteln.

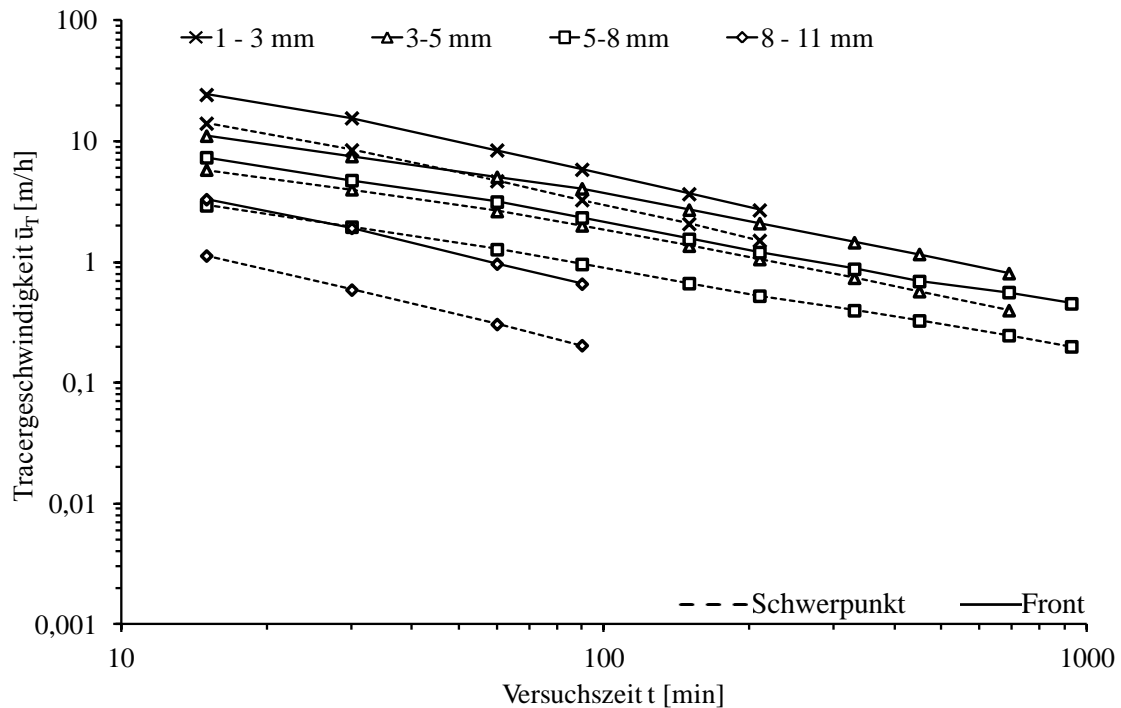


Abb. 6.17: Über die Laufzeit gemittelte Transportgeschwindigkeiten \bar{u}_T für Tracerfront und -schwerpunkt über Z_{X1} bei $\tau_0 = 9,3 \text{ N/m}^2$

Diese Form der Betrachtung ist damit für die Untersuchung des zeitlichen Verlaufs der Transportgeschwindigkeiten und damit auch des Transportprozesses ungeeignet. In den weiteren Ergebnisdarstellungen werden deshalb ausschließlich die Transportgeschwindigkeiten u_T vorgestellt, die für die einzelnen Zeitabschnitte zwischen den Messzeitpunkten bestimmt wurden.

6.5.1.2 Tracerversuche über Z_{X1} , $\tau_0 = 10,73 \text{ N/m}^2$

In den nachfolgend beschriebenen Versuchen mit der Deckschicht Z_{X1} betrug die Sohlen Schubspannung $\tau_0 = 10,7 \text{ N/m}^2$ ($Q_{exp} = 100 \text{ l/s}$, $h = 0,22 \text{ m}$, $I = 0,5 \%$) und entsprach damit der kritischen Schubspannung der Deckschicht. Die Experimente wurden mit den Tracerfraktionen 3-5 mm, 5-8 mm, 8-11 mm und 11-16 mm für eine maximale Versuchsdauer von 930 min durchgeführt. Wie in den Versuchen mit $\tau_0 = 9,3 \text{ N/m}^2$ war die Größe der Tracerbarre für alle Tracerfraktionen identisch ($b_T = 0,5 \text{ m}$, $l_T = 0,25 \text{ m}$, $h_t = 0,025 \text{ m}$). Der Versuch mit der Tracerfraktion 11-16 mm wurde nach 210 min abgebrochen, da die Tracerbarre infolge der Strömung nur geringfügig abgetragen wurde. Dies führte, wie bei dem Versuch mit $\tau_0 = 9,3 \text{ N/m}^2$ und $d_T = 8-11 \text{ mm}$, zu einer lokalen Erosion der Deckschicht am Fuß der Tracerbarre. Der Versuch mit der Tracerfraktion 3-5 mm konnte hinsichtlich der Tracerverteilung nur bis zu einer Versuchsdauer von 210 min ausgewertet werden, da die Tracerfront das Rinnenende vor dem nächsten Messzeitpunkt überschritten hatte.

Die beobachteten Transportprozesse ähneln in ihren Abhängigkeiten den Prozessen der vorangehend beschriebenen Versuche. Deshalb werden die Unterschiede und Gemeinsamkeiten der Versuche mit $\tau_0 = 10,7 \text{ N/m}^2$ und $\tau_0 = 9,3 \text{ N/m}^2$ lediglich anhand der Transportweiten L_F und L_S , dem Verhältnis L_F/L_S und der über den Zeitraum zwischen zwei Messereignissen gemittelten Transportgeschwindigkeiten $u_{T,F}$ und $u_{T,S}$ erläutert. Detaillierte Zahlenangaben zu den Versuchsergebnissen finden sich in Anhang A.2.

Analog zu den vorangehend beschriebenen Ergebnissen zeigt sich ebenfalls, dass die Transportweite nach der gleichen Versuchszeit mit kleiner werdendem Korndurchmesser der Tracer zunimmt, vgl. Abb. 6.18.

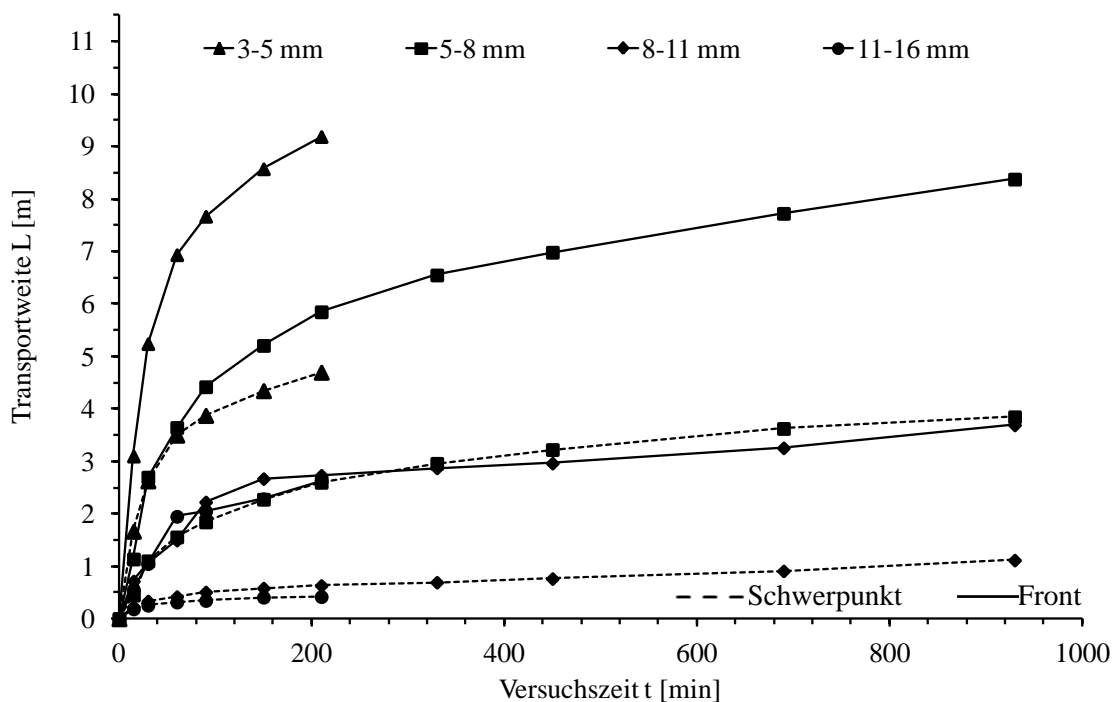


Abb. 6.18: Transportweite von Tracerfront und -schwerpunkt über Z_{X1} bei $\tau_0 = 10,7 \text{ N/m}^2$

Die Kurven der Transportweiten weisen ebenfalls einen asymptotischen Verlauf auf, d.h. die Zunahme der Transportweite nimmt mit fortschreitender Versuchszeit ab. Nach 210 min liegen die Transportweiten der Tracerfront mit $d_T = 3-5 \text{ mm}$ bei 9,19 m, mit $d_T = 5-8 \text{ mm}$ bei 5,85 m, mit $d_T = 8-11 \text{ mm}$ bei 2,73 m und mit $d_T = 11-16 \text{ mm}$ bei 2,62 m. Die Transportweite der Tracerfront ist damit nach 210 min 1,85 m ($L_{F,80l/s} = 7,34 \text{ m}$) für $d_T = 3-5 \text{ mm}$ bzw. 1,61 m ($L_{F,80l/s} = 4,24 \text{ m}$) für $d_T = 5-8 \text{ mm}$ größer als in den Versuchen mit $Q_{exp} = 80 \text{ l/s}$. Die angreifende Sohlschubspannung τ_0 bzw. der Durchfluss Q_{exp} haben also einen unmittelbaren Einfluss auf die Transportweite.

Das Verhältnis der Transportweiten L_F und L_S beträgt für die Fraktionen 3-5 mm im Mittel 1,96 und für 5-8 mm 2,27, Abb. 6.19. Für die Versuche mit den größeren Fraktionen 8-11 ($\tau_{0c} = 7,1 \text{ N/m}^2$) und 11-16 mm ($\tau_{0c} = 10 \text{ N/m}^2$) ergeben sich, bei insgesamt deutlich niedrigeren Transportweiten, gemittelte Werte von $L_F/L_S = 3,79$ bzw. 5,15, Tab. 6.8.

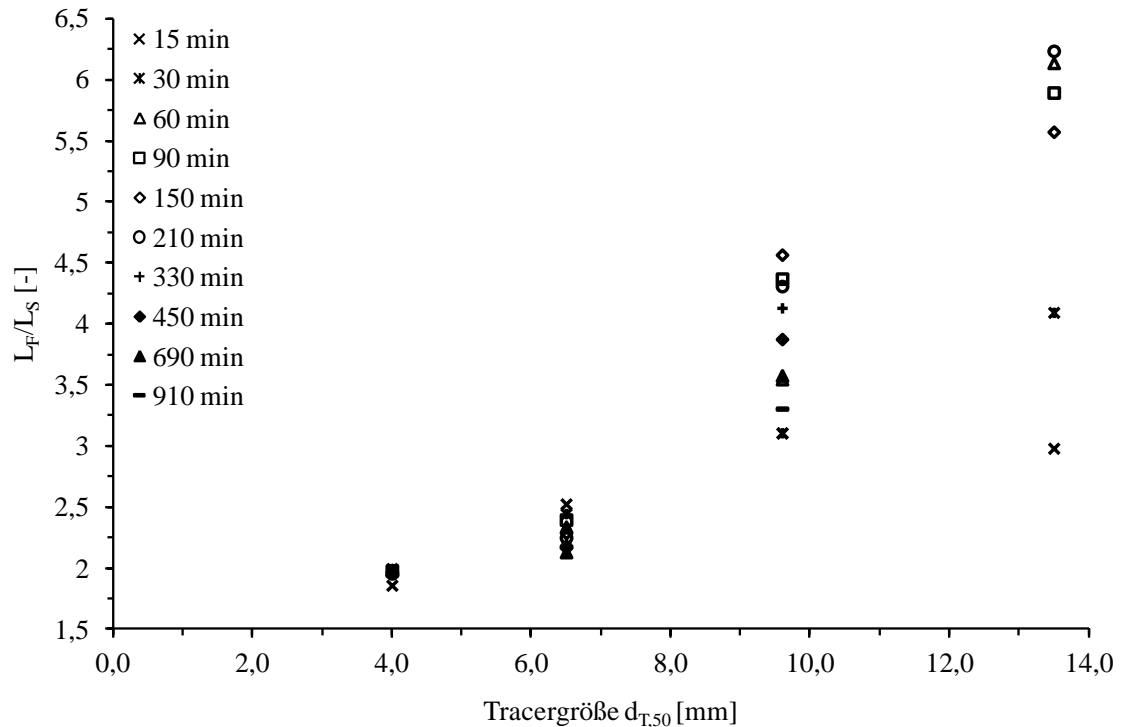


Abb. 6.19: Verhältnis der Transportweiten der Tracerfront L_F und des Schwerpunkts L_S als Funktion der mittleren Korngröße der Tracer $d_{T,50}$ über Z_{X1} bei $\tau_0 = 10,7 \text{ N/m}^2$

Die festgestellte Schwankungsbreite ist für die beiden Tracergrößen 8-11 mm und 11-16 mm erheblich größer als bei den kleineren Fraktionen. Für beide Korngrößen treten zu Beginn der Versuche die geringsten Werte für das Verhältnis der Transportweiten auf ($d_T = 8\text{-}11 \text{ mm}$: $L_{F,t=15\text{min}}/L_{S,t=15\text{min}} = 3,11$, $d_T = 11\text{-}16 \text{ mm}$: $L_{F,t=15\text{min}}/L_{S,t=15\text{min}} = 2,98$). Danach nimmt der Grad der Dispersion mit zunehmender Ausbreitung und abnehmendem Transport deutlich zu.

Tab. 6.8: Verhältnis der Transportweiten der Tracerfront L_F und des Schwerpunkts L_S für die verschiedenen Tracerfraktionen mit Z_{X1} und $\tau_0 = 10,7 \text{ N/m}^2$

		Tracerfraktion			
		3-5 mm	5-8 mm	8-11 mm	11-16 mm
L_F/L_S	Mittelwert	1,96	2,27	3,79	5,15
	Minimum	1,86	2,10	3,11	2,98
	Maximum	2,0	2,53	4,75	6,24

In der Darstellung der Geschwindigkeiten (für den Zeitschritt zwischen zwei Messungen berechnet) von Tracerfront und -schwerpunkt in Abb. 6.20 zeigt sich, entsprechend der Versuche mit $\tau_0 = 9,3 \text{ N/m}^2$, dass die Frontgeschwindigkeiten höher sind als die Schwerpunktschwindigkeiten und die kleineren Tracer schneller transportiert werden als die größeren. Die Kurvenverläufe der Frontgeschwindigkeiten weisen bei den Fraktionen mit geringerer Mobilität sehr starke Fluktuationen auf. Die Tracerfronten schreiten bei großen Tracern also deutlich unstetiger voran als die Schwerpunkte (Abb. 6.20). Hierin ist auch die Erklärung für die starken Schwankungen von L_F/L_S zu finden, die sich für diese Fraktionen ergeben (Abb. 6.19).

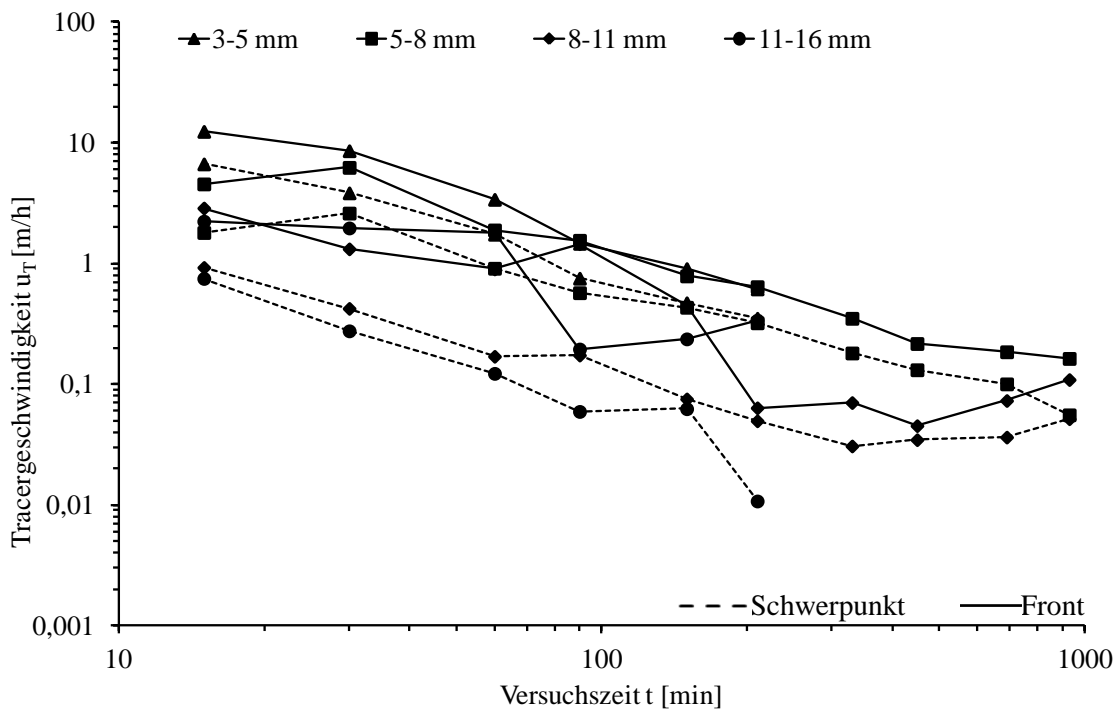


Abb. 6.20: Front- und Schwerpunktschwindigkeit der Tracer über Z_{X1} bei $\tau_0 = 10,7 \text{ N/m}^2$

Die Versuchsergebnisse zeigen weiterhin, dass der Tracer bei höherem Durchfluss zwar anfänglich deutlich schneller transportiert wird, jedoch im weiteren Versuchsverlauf eine stärkere Abnahme der Geschwindigkeit zu beobachten ist als in den Versuchen mit der geringeren Sohlschubspannung. Die Transportgeschwindigkeiten in den Versuchen mit $\tau_0 = 10,7 \text{ N/m}^2$ nähern sich mit der Zeit an die Geschwindigkeiten an, die für die gleichen Fraktionen für $\tau_0 = 9,3 \text{ N/m}^2$ ermittelt wurden. Die in Abb. 6.21 dargestellten Versuche wurden beide mit einer Tracergröße von 5-8 mm und einem anfänglichen Durchfluss von 80 l/s durchgeführt. Nach einer Versuchszeit von 15 min wurde der Durchfluss bei dem Versuch für $\tau_0 = 10,7 \text{ N/m}^2$ auf den kritischen Durchfluss von 100 l/s erhöht und bis zum Versuchsende konstant gehalten. Die Front- und Schwerpunktschwindigkeit nehmen mit dem gesteigerten Durchfluss zunächst deutlich zu. Im weiteren Versuchsverlauf nähern sich die Geschwindig-

keiten jedoch denen des Versuchs mit konstantem Durchfluss $\tau_0 = 9,3 \text{ N/m}^2$ an und entsprechen diesen nach einer Zeitspanne von ca. 330 min. Mit zunehmender Ausbreitung der Tracer nimmt also der Einfluss der angreifenden Strömungskraft auf die Transportgeschwindigkeit ab.

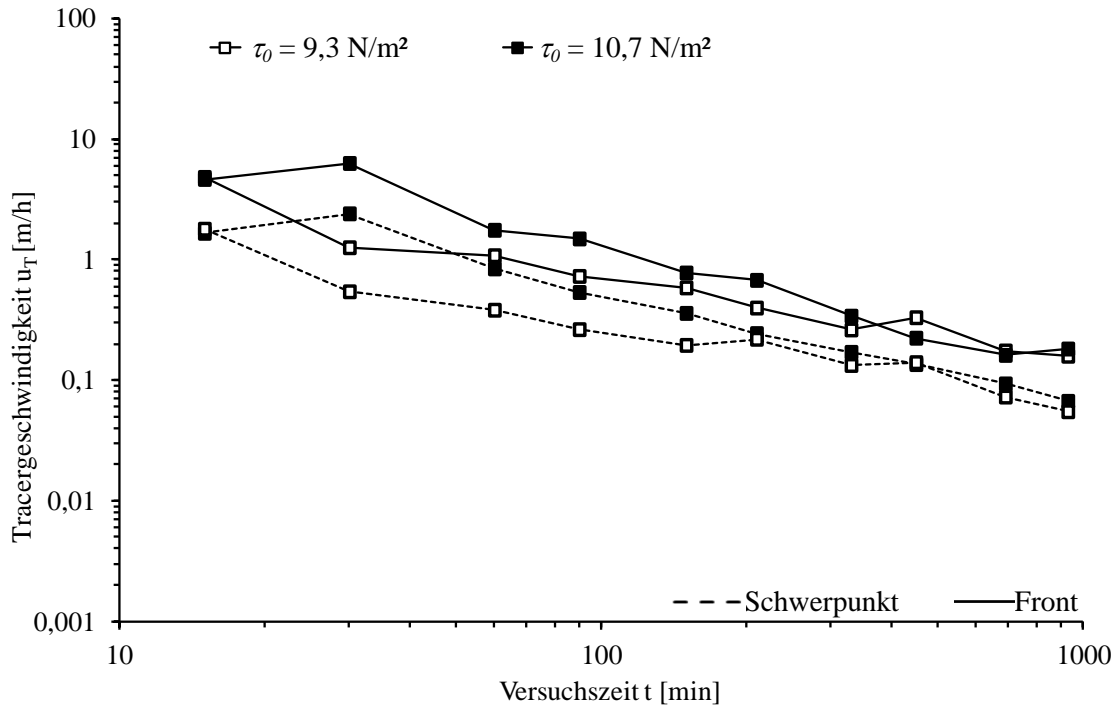


Abb. 6.21: Transportgeschwindigkeiten mit $d_T = 5-8 \text{ mm}$ über Z_{X1} bei $\tau_0 = 9,3 \text{ N/m}^2$ und $\tau_0 = 10,7 \text{ N/m}^2$

Der Zusammenhang der mittleren Transportgeschwindigkeit $u_{T,S}$ und der Flächenkonzentration C_A ist in Abb. 6.22 dargestellt. Es zeigt sich, wie bei den Versuchen mit $\tau_0 = 9,3 \text{ N/m}^2$, dass die Geschwindigkeit der Tracer mit abnehmender Flächenkonzentration ebenfalls abnimmt. Insgesamt sind die Transportgeschwindigkeiten dabei mit kleinerem Tracer höher als mit größerem Tracer. Die Geschwindigkeit der Tracerfraktionen 11-16 mm liegt dabei nur geringfügig unter der mit $d_T = 8-11$. Das bedeutet, dass diese beiden Fraktionen bei gleicher Flächenkonzentration eine ähnliche Mobilität aufweisen. Die Geschwindigkeiten der Fraktionen 3-5 und 5-8 mm heben sich hingegen deutlich voneinander und von den größeren Tracerkörnern ab. Mit abnehmender Flächenkonzentration verliert der Tracer mit $d_T = 3-5 \text{ mm}$ allerdings schneller an Geschwindigkeit, als der Tracer mit $d_T = 5-8 \text{ mm}$. Unterhalb einer Konzentration von $C_A = 0,08 \text{ m}^2/\text{m}^2$ bewegen sich die beiden Fraktionen etwa mit gleicher Geschwindigkeit.

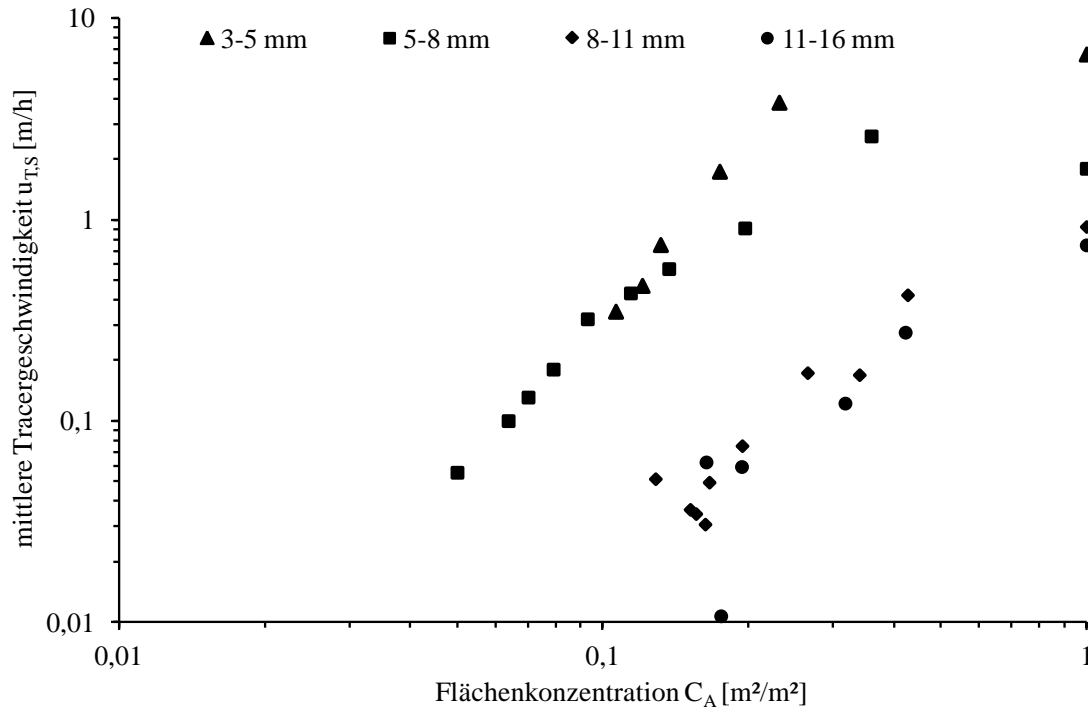


Abb. 6.22: Schwerpunktgeschwindigkeit $u_{T,S}$ in Abhängigkeit von der Flächenkonzentration der Tracer über Z_{X1} bei $\tau_0 = 10,7 \text{ N/m}^2$

6.5.2 Transport über D_{X2} ($d_m = 21,4 \text{ mm}$, $\tau_{0c} = 13,6 \text{ N/m}^2$)

Die Experimente mit der Deckschicht D_{X2} wurden mit einer Sohlschubspannung von $\tau_0 = \tau_{crit,D} = 13,6 \text{ N/m}^2$ ($Q_{exp} = 120 \text{ l/s}$) durchgeführt. Die mittlere Fließtiefe betrug hierbei $0,275 \text{ m}$ bei $0,5 \%$ Gefälle. Die Versuche erfolgten mit den Tracerfraktionen $3-5 \text{ mm}$, $5-8 \text{ mm}$ und $8-11 \text{ mm}$. Zusätzlich wurde ein Versuch mit einer Tracermischung ($d_T = 3-11 \text{ mm}$) vorgenommen, die zu jeweils einem Drittel aus den Fraktionen $3-5 \text{ mm}$, $5-8 \text{ mm}$ und $8-11 \text{ mm}$ bestand. Die Dimensionen der Tracerbarren entsprachen in allen Versuchen den Abmessungen in den Versuchen mit der Deckschicht Z_{X1} ($b_T = 0,5 \text{ m}$, $l_T = 0,25 \text{ m}$, $h_t = 0,025 \text{ m}$). In Anhang A.3 sind die Versuchsergebnisse tabellarisch zusammengefasst.

Es zeigt sich, wie bereits in den Versuchen mit Z_{X1} , ein asymptotischer Verlauf der Transportweiten und eine Zunahme der Transportweiten mit abnehmender Korngröße (Abb. 6.23). Trotz des höheren Strömungsangriffs liegen die zu einem Zeitpunkt t ermittelten Transportweiten unterhalb der erreichten Transportweiten in den Versuchen mit Z_{X1} und $\tau_0 = 10,7 \text{ N/m}^2$ und im Fall der Tracerfraktion $3-5 \text{ mm}$ sogar unterhalb der mit Z_{X1} und $\tau_0 = 9,3 \text{ N/m}^2$ gemessenen Transportweite. Die Transportweite der Kornfraktion $3-5 \text{ mm}$ über der Deckschicht D_{X2} mit $\tau_0 = 13,5 \text{ N/m}^2$ beträgt nach 930 min lediglich $7,5 \text{ m}$. Demgegenüber steht eine Transportweite der gleichen Tracerfraktion über der Deckschicht Z_{X1} ($\tau_0 = 9,3 \text{ N/m}^2$) von $9,45 \text{ m}$

nach 690 min. Der Grund hierfür ist vermutlich der (visuell festgestellte) größere Lückenraum zwischen den Körnern der Sohlenoberfläche der Deckschicht D_{X2} (vgl. Kap. 6.3.1), durch den die Tracerkörner zurückgehalten werden. Die Struktur der Oberfläche der Deckschicht hätte damit einen maßgeblichen Einfluss auf die Transportweite. Eine signifikante Einmischung des Tracers in tiefere Sohlenschichten fand mit keiner der gewählten Kornfraktionen statt.

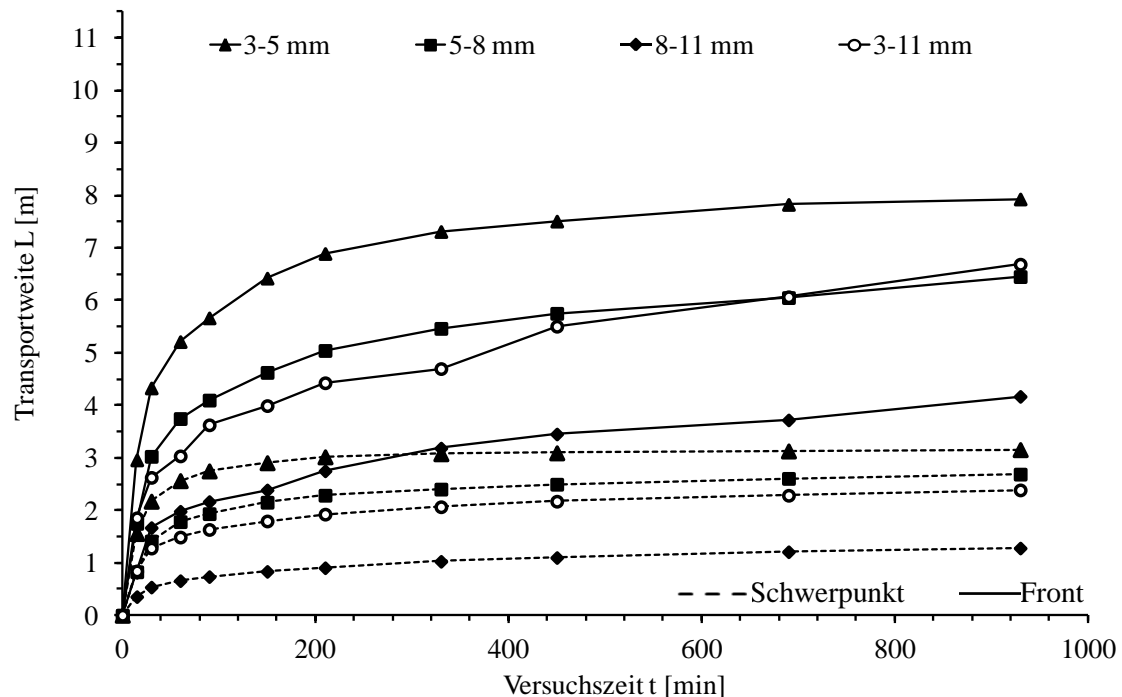


Abb. 6.23: Transportweite von Tracerfront und -schwerpunkt über D_{X2} bei $\tau_0 = 13,5 \text{ N/m}^2$

Für das Verhältnis L_F/L_S der gemessenen Transportweiten von Front und Schwerpunkt der Tracerverteilungen ergeben sich die in Tab. 6.8 zusammengestellten Werte. Die Schwankungsbreite der ermittelten Einzelwerte um die Mittelwerte herum ist dabei geringer als bei den Versuchen mit Z_{X1} und $\tau_0 = 10,7 \text{ N/m}^2$.

Tab. 6.9: Verhältnis der Transportweiten der Tracerfront L_F und des Schwerpunkts L_S für die verschiedenen Tracerfraktionen mit D_{X2} und $\tau_0 = 13,5 \text{ N/m}^2$

		Tracerfraktion			
		3-5 mm	5-8 mm	8-11 mm	3-11 mm
L_F/L_S	Mittelwert	2,23	2,21	2,98	2,33
	Minimum	1,90	2,10	2,30	2,04
	Maximum	2,51	2,40	3,26	2,80

Im Gegensatz zu den vorangehend beschriebenen Untersuchungen ist für die Fraktionen 3-5, 5-8, und 3-11 mm keine Eindeutige Abhängigkeit der Dispersion von der Korngröße zu erkennen. Der Einfluss der groben Sohlenoberfläche von D_{X2} scheint die Bedeutung der Korngröße für die Tracerdispersion zu überlagern. In Abb. 6.24 sind die aus den Versuchsdaten ermittelten Verhältnisse der Transportweiten von Tracerfront und -schwerpunkt über der mittleren Korngröße der Tracer $d_{T,50}$ angetragen. Bei allen vier Versuchen nimmt der Grad der Dispersion mit zunehmender Versuchszeit, d.h. mit abnehmendem Transport, zu. Besonders ausgeprägt ist dies mit dem Tracer 8-11 mm ($d_{T,50} = 9,5$ mm). Zu Beginn des Versuchs beträgt $L_F/L_S = 2,30$ und steigt bis zum Ende auf 3,26 an. Die schnelle Zunahme mit der Zeit deutet auf eine schnell abnehmende Mobilität der Tracerschwerpunkte hin, wohingegen die Abnahme der Frontgeschwindigkeit geringer ist.

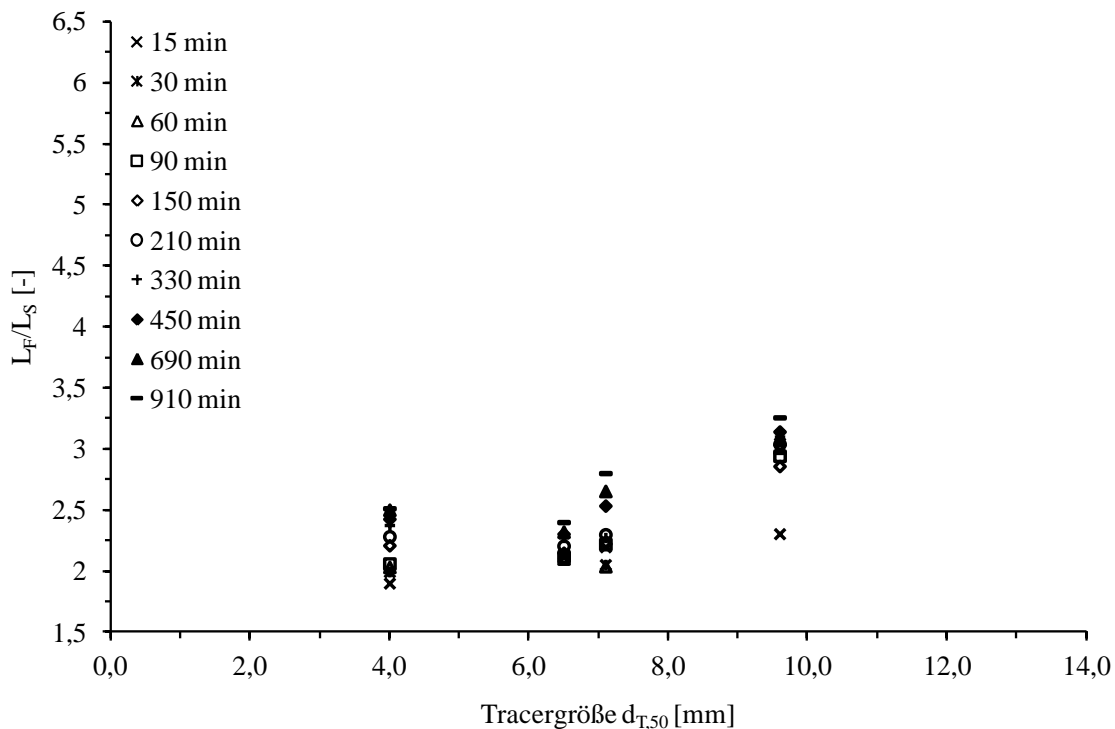


Abb. 6.24: Verhältnis der Transportweiten der Tracerfront L_F und des Schwerpunkts L_S als Funktion der mittleren Korngröße der Tracer $d_{T,50}$ über D_{X2} bei $\tau_0 = 13,5$ N/m²

Dies lässt sich auch anhand der in Abb. 6.25 dargestellten Transportgeschwindigkeiten der Tracer zeigen, die erwartungsgemäß für kleinere Tracer höher sind als für größere Tracer. Wie in den Versuchen, die in Abschnitt 6.5.1 beschrieben sind, nimmt die Geschwindigkeit mit der Versuchszeit ab.

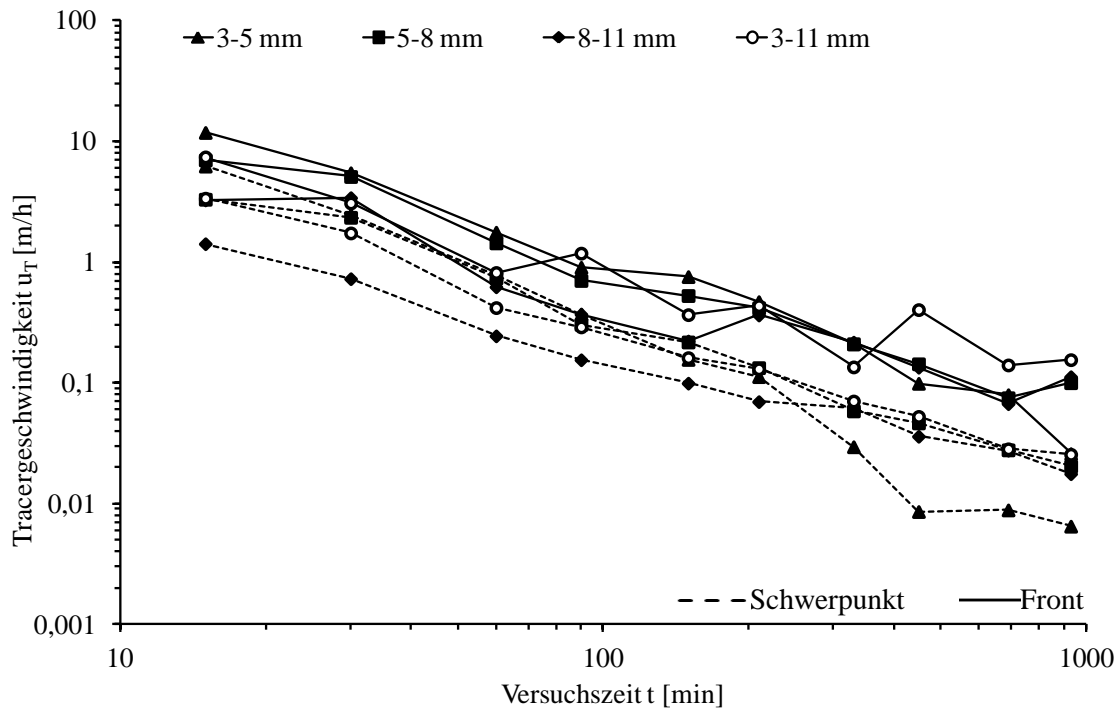


Abb. 6.25: Front- und Schwerpunktgeschwindigkeit der Tracer über D_{X2} bei $\tau_0 = 13,5 \text{ N/m}^2$

Der Gradient der Geschwindigkeitsabnahme ist auf der raueren Sohle allerdings größer als in den Versuchen mit Z_{X1} . Die Tracerfraktion 3-5 mm startet z.B. mit einer mittleren Transportgeschwindigkeit von 6,23 m/h die nach einer Versuchsdauer von 210 min bereits auf $u_{T,S} = 0,11 \text{ m/h}$ abgesunken ist. Zu diesem Zeitpunkt beträgt die Geschwindigkeit über Z_{X1} bei $\tau_0 = 10,7 \text{ N/m}^2$ noch 0,35 m/h. Die gröbere, offenere Oberfläche von D_{X2} hat also im Vergleich zu Z_{X1} eine verzögernde Wirkung auf die Transportgeschwindigkeit.

Das Korngemisch mit $d_T = 3-11 \text{ mm}$ weist einen mittleren Korndurchmesser von $d_{T,50} = 7,1 \text{ mm}$ auf. Die Transportweiten für diese Kiesmischung (Abb. 6.21) sind etwas geringer als die der Einzelfraktion $d_T = 5-8 \text{ mm}$ mit $d_{T,50} = 6,5 \text{ mm}$. Sie entsprechen damit den Transportweiten, die, ausgehend von den Versuchen für die Einzelfractionen, für ein Einkornmaterial $d_T = 7,1 \text{ mm}$ zu erwarten wären. Transportweite und -geschwindigkeit werden dementsprechend also maßgeblich vom mittleren Korndurchmesser einer Kiesmischung bestimmt.

In Abb. 6.26 sind die Transportweiten der Kiesmischung und der einzelnen Fraktionen, aus denen die Kiesmischung erstellt wurde, über die Versuchszeit aufgetragen. Nach 930 min beträgt die Transportweite der Kiesmischung ca. 6,3 m und für die einzelnen Fraktionen ergaben sich Transportweiten von 4,4 m für $d_T = 3-5 \text{ mm}$, 5,8 m für $d_T = 5-8 \text{ mm}$ und 7,3 m für $d_T = 8-11 \text{ mm}$. Entgegengesetzt zu den bisherigen Ergebnissen wird also nicht die kleinste

Fraktion, sondern die größte Fraktion am weitesten transportiert. Dies deckt sich mit den visuellen Beobachtungen während des Versuchs, bei dem zunächst für einen kurzen Zeitraum die Tracerfraktion 3-5 mm vor den restlichen Tracerfraktionen voranlief.

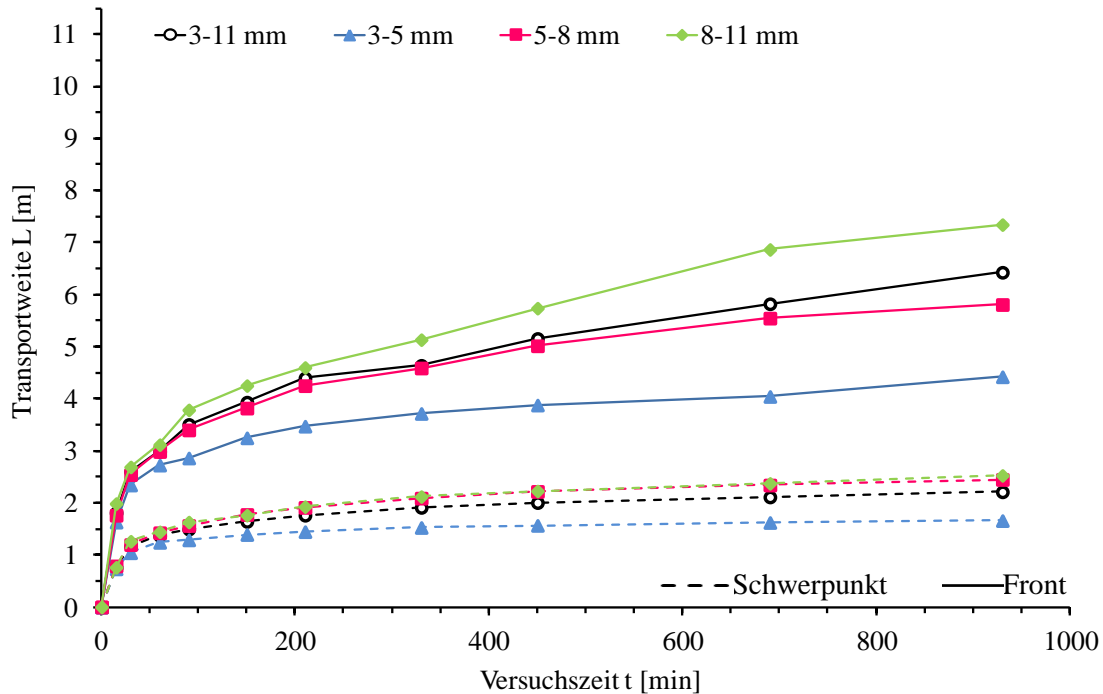


Abb. 6.26: Transportweiten der Kiesmischung 3-11 mm und der drei Fraktionen 3-5 mm, 5-8 mm und 8-11 mm über D_{X2} bei $\tau_0 = 10,7 \text{ N/m}^2$

Durch Verfüllung des Lückensystems der Deckschicht wurde so der Transport der größeren Fraktionen begünstigt. Entsprechend der Messergebnisse gilt das Gleiche für die Fraktion 5-8 mm, so dass für die Fraktion 8-11 mm nur noch ein verkleinerter Lückenraum zur Verfügung stand und die Partikel dementsprechend weiter transportiert wurden.

6.5.3 Transport über Z_{X3} ($d_m = 13,4 \text{ mm}$, $\tau_{0c} = 6,4 \text{ N/m}^2$)

Der Einfluss der Zugabemenge wurde anhand von Experimenten in der „Kleinen Rinne“ mit der Deckschicht Z_{X3} untersucht. Die Versuche wurden für die Geschiebemengen mit einer Masse von $M_T = 1,1 \text{ kg}$, $2,0 \text{ kg}$, $2,2 \text{ kg}$, $3,3 \text{ kg}$ und $4,4 \text{ kg}$ durchgeführt. Die Front der jeweiligen Tracerbarre lag 2 m unterhalb des Rinnenzulaufes, so dass für die Tracerversuche eine Länge der Deckschicht von 3,3 m zur Verfügung stand. Die Sohlenschubspannung betrug $\tau_0 = \tau_{crit} = 6,4 \text{ N/m}^2$ ($Q_{exp} = 28,9 \text{ l/s}$, $h = 0,13 \text{ m}$, $I = 0,5\%$). Als externes Geschiebe wurde der Tracer mit einem Durchmesser von 3-5 mm verwendet. Die Gesamtversuchsdauer betrug in jedem Versuch wiederum 930 min, die Analyse der Sohlenfotografien wurde jedoch nur bis zu der Versuchszeit durchgeführt, zu der die Tracerfront gerade noch nicht das unterstromige

Ende der Deckschicht überschritten hatte (vgl. Abschnitt 6.4.2). Eine vollständige Auflistung der Versuchsergebnisse ist in Anhang A.4 zusammengestellt.

In Abb. 6.27 sind für die fünf Versuche mit den oben genannten Zugabemengen die aus den Tracerverteilungen ermittelten Transportweiten für Tracerfront und -schwerpunkt als Summenlinie über der Versuchszeit dargestellt.

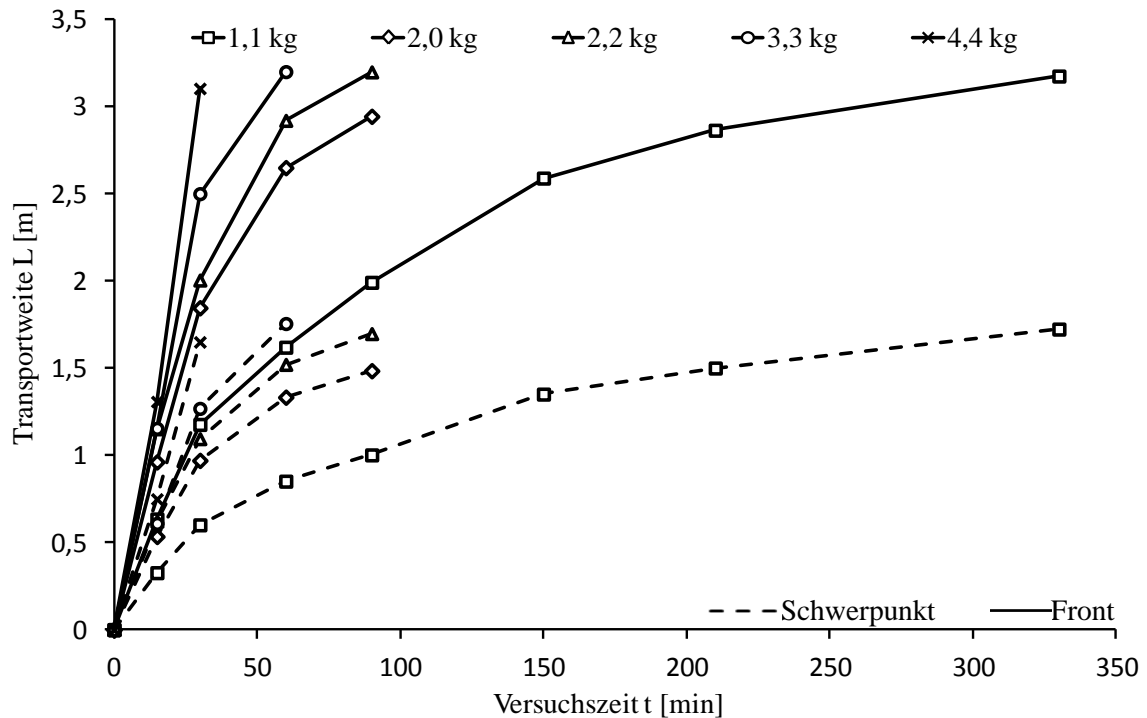


Abb. 6.27: Transportweiten in Abhängigkeit von der Zugabemenge über Z_{x3} bei $\tau_0 = 6,4 \text{ N/m}^2$ (aus Koll & Koll, 2012)

Die Tracerfront ist, wie in den Versuchen in der hydraulischen Kipprinne, schneller als der Schwerpunkt der Tracerverteilungen und die Transportgeschwindigkeiten nehmen mit der Zeit ab. Die Erhöhung der Zugabemenge bewirkt, dass die Transportgeschwindigkeiten steigen. Dementsprechend benötigt der Tracer bei einer Zugabe von 4,4 kg lediglich 30 min um 3,2 m zurückzulegen. Der Versuch mit einer Tracermasse von 1,1 kg benötigt 330 min für die gleiche Distanz (vgl. Koll & Koll 2012).

Die Werte für L_F/L_S schwanken in einem Bereich von 1,75 und 1,99 um einen Mittelwert von 1,9 (vgl. Abb. 6.28). Der Gradient der Dispersion scheint dabei nicht von der Zugabemenge abhängig zu sein. Ebenso wenig kann ein Zusammenhang des Verhältnisses der Transportweiten von Tracerfront und -schwerpunkt mit der Versuchsdauer festgestellt werden. Dies deutet darauf hin, dass zumindest für den Beobachtungszeitraum eine lineare Zunahme der Dispersion vorliegt.

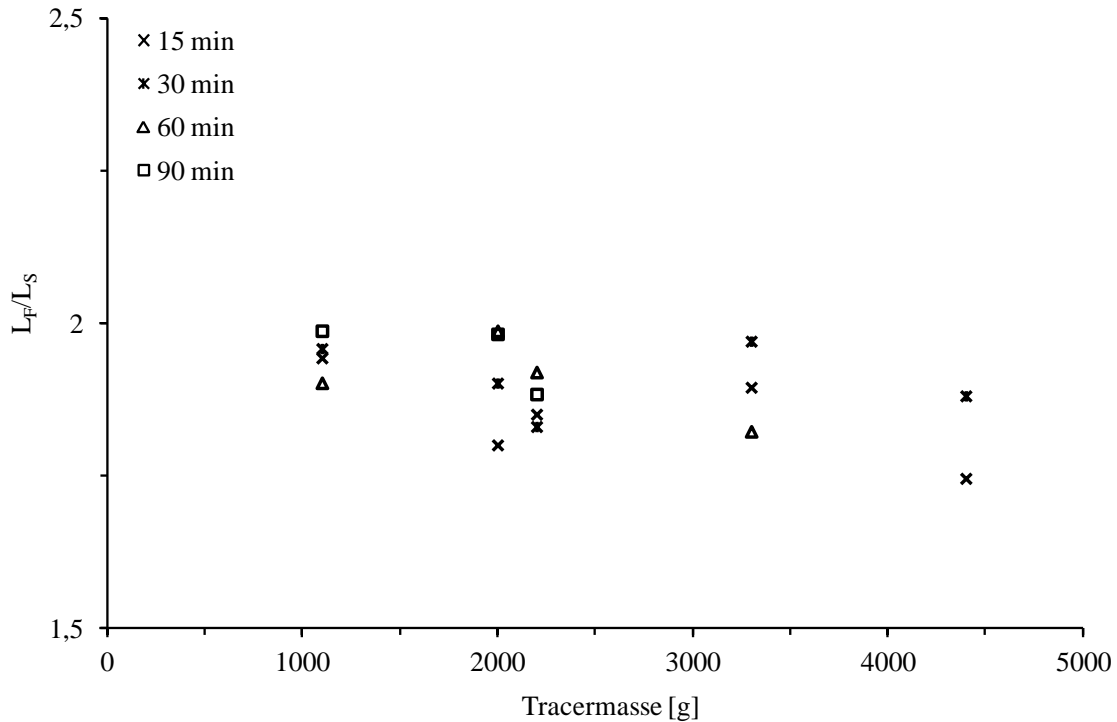


Abb. 6.28: Verhältnis der Transportweiten der Tracerfront L_F und des Schwerpunkts L_S als Funktion der Zugabemenge, mit $d_T = 3\text{-}5\text{ mm}$ über Z_{X3} bei $\tau_0 = 6,4\text{ N/m}^2$

In Abb. 6.29 ist die mittlere Transportweite in Abhängigkeit von der Zugabemenge für die Zeitschritte 15, 30, 60 und 90 min dargestellt. In der Darstellung wird der Einfluss der zugegebenen Tracermasse auf die Transportweite und damit auch auf die Transportgeschwindigkeit zu einem Zeitpunkt t deutlich. In jedem der Zeitschritte nimmt die Transportgeschwindigkeit mit der Tracermasse zu. Die Bedeutung der Tracermasse für die Transportgeschwindigkeit wird dabei mit zunehmender Versuchszeit größer, worauf die mit der Versuchszeit zunehmende Steigung der Ausgleichsfunktionen hinweist.

Es ist zu anzunehmen, dass eine weitere Steigerung der Tracermasse zu einem Punkt führt, ab dem die Annahme einer linearen Abhängigkeit der Transportgeschwindigkeit unzureichend ist (vgl. Koll & Koll, 2012). Vermutlich wird sich diese asymptotisch an einen Grenzwert annähern. Eine Untersuchung dieses Übergangsbereichs war mit dem gewählten Versuchsaufbau allerdings nicht möglich.

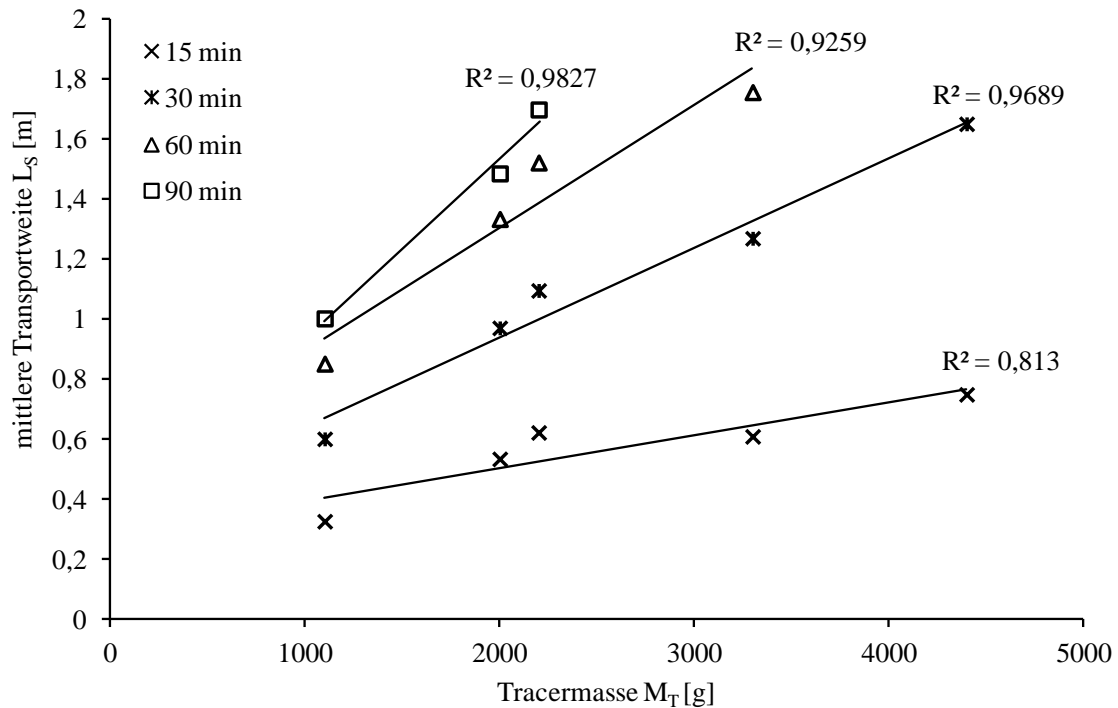


Abb. 6.29: Mittlere Transportweite L_S als Funktion der Zugabemenge der Tracer M_T über Z_{X3} bei $\tau_0 = 6,4 \text{ N/m}^2$

6.5.4 Ergebnisse zum Einfluss des Transports auf die Sohlenstabilität

Die Veränderung der Sohlenstabilität infolge des Transports von externem Geschiebe über statische Deckschichten wird anhand des Sohlenmaterials beurteilt, das während der Versuche aus der Deckschicht herausgelöst und ausgetragen wird. Es zeigt sich, dass auch während der Tracerversuche die Austragsmengen nur sehr gering sind ($g_B \leq 740 \text{ g/m} \cdot \text{h}$ mit Z_{X1} , $\tau_{0c} = 10,7 \text{ N/m}^2$). Dies entspricht einer dimensionslosen Transportrate von maximal $W^* = 0,00123$, die damit immer noch deutlich unterhalb der von Parker & Klingeman (1982) bestimmten Grenze zwischen Bewegung und Ruhe ($W_r^* = 0,00218$) liegt. Damit kann für die Tracerversuche davon ausgegangen werden, dass der Anteil von Sohlenmaterial am Transportgeschehen vernachlässigt werden kann.

Auch wenn die Austragsmengen so gering waren, dass die Sohle auch weiterhin als stabil angesehen werden konnte, so war dennoch eine Erhöhung des Austrags von Sohlenmaterial messbar (siehe hierzu auch Koll et al., 2010). Eine qualitative Beurteilung des Einflusses von Geschiebetransport auf die Stabilität von Deckschichten ist anhand der Versuche mit der Deckschicht Z_{X1} möglich. Die festgestellten Transportmengen sind ausreichend groß, um eine Quantifizierung des erodierten Materials durchzuführen. Abb. 6.30 zeigt die Menge an erodiertem Deckschichtmaterial während der Versuche mit Z_{X1} und $\tau_0 = 9,3 \text{ N/m}^2$ und den Tracerfraktionen 1-3, 3-5, 5-8 und 8-11 mm. Die Auftragung erfolgt als relative Erosion über die

Versuchszeit. Hierunter ist das Verhältnis des erodierten Sohlenmaterials zu dem Grundaustrag von $g_0 = 40 \text{ g/(m}\cdot\text{h)}$, der bei Klarwasserabfluss für eine Sohlenschubspannung von $\tau_0 = 9,3 \text{ N/m}^2$ festgestellt wurde, zu verstehen (siehe Kap. 6.3.1).

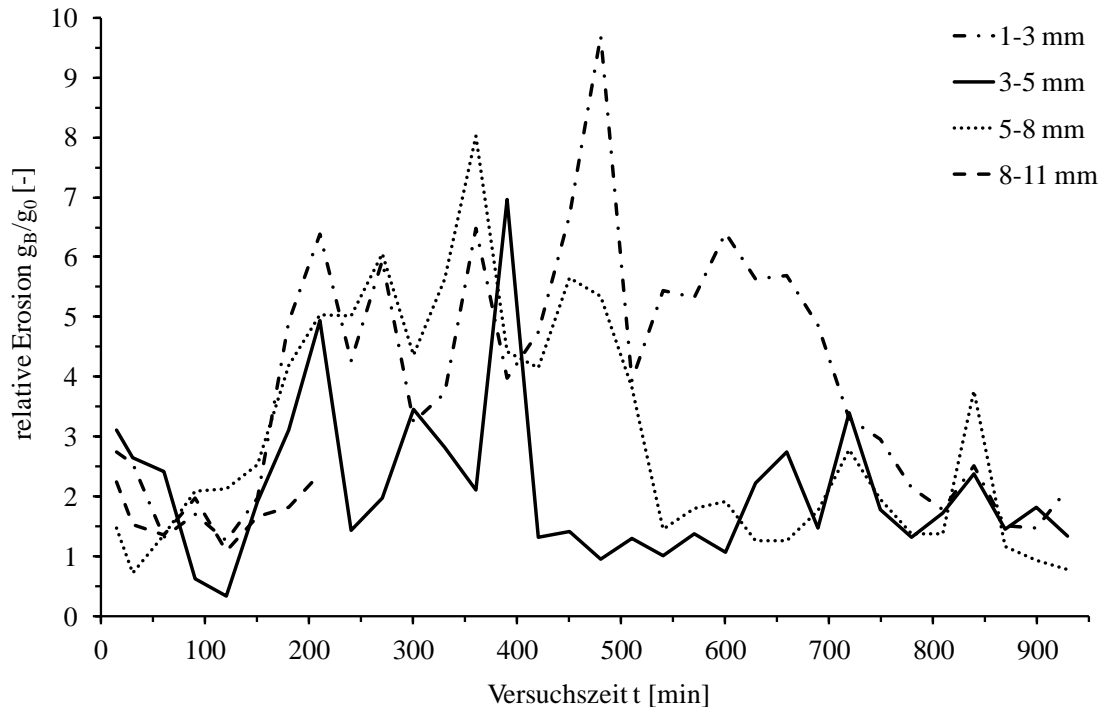


Abb. 6.30: Erodiertes Deckschichtmaterial während der Tracerversuche über Z_{X1} bei $\tau_0 = 9,3 \text{ N/m}^2$

Während des Transports von externem Geschiebe wird eindeutig Sohlenmaterial mobilisiert. Die Erosion ist dabei mit kleiner werdendem Tracer größer, als mit den größeren Tracerfraktionen. Am meisten Sohlenmaterial wurde durch die Tracergröße 1-3 mm mit einer maximalen Menge von ca. dem 9,5-fachen des Grundaustrags, also ca. $380 \text{ g/(m}\cdot\text{h)}$, erodiert. Abhängig von der Tracerfraktion hält diese zusätzliche Deckschichterosion unterschiedlich lange an. Bei der Tracerfraktion 3-5 mm erreicht die Sohlenerosion bereits nach einer Versuchsdauer von 210 min wieder das Niveau des vorher bestimmten Grundaustrags. Bei $d_T = 5-8 \text{ mm}$ wird der Grundaustrag nach ca. 480 min und mit $d_T = 1-3 \text{ mm}$ nach ca. 720 min wieder erreicht. Der Versuch mit $d_T = 8-11 \text{ mm}$ wurde lediglich für 210 min durchgeführt, da unerwünschte Kolkbildungen infolge der nicht vollständig abtransportierten Tracerbarre auftraten. Insgesamt kann kein nachhaltiger, signifikanter Einfluss des Transportgeschehens auf die Deckschichtstabilität festgestellt werden. Nach Beendigung des Transports von externem Material stabilisiert sich die Sohle wieder und die Gesamttransportmenge an erodiertem Sohlenmaterial ist deutlich kleiner als die Menge an zugeführtem Material.

Die Ergebnisse der Versuche mit Z_{X1} und einer Sohlenschubspannung von $\tau_0 = 10,7 \text{ N/m}^2$ ($g_0 = 210 \text{ g/(m}\cdot\text{h)}$) sind in Abbildung 6.31 dargestellt. Der Austrag von Sohlenmaterial ist, wie bei den Versuchen mit $\tau_0 = 9,3 \text{ N/m}^2$, bei allen Transportversuchen erhöht.

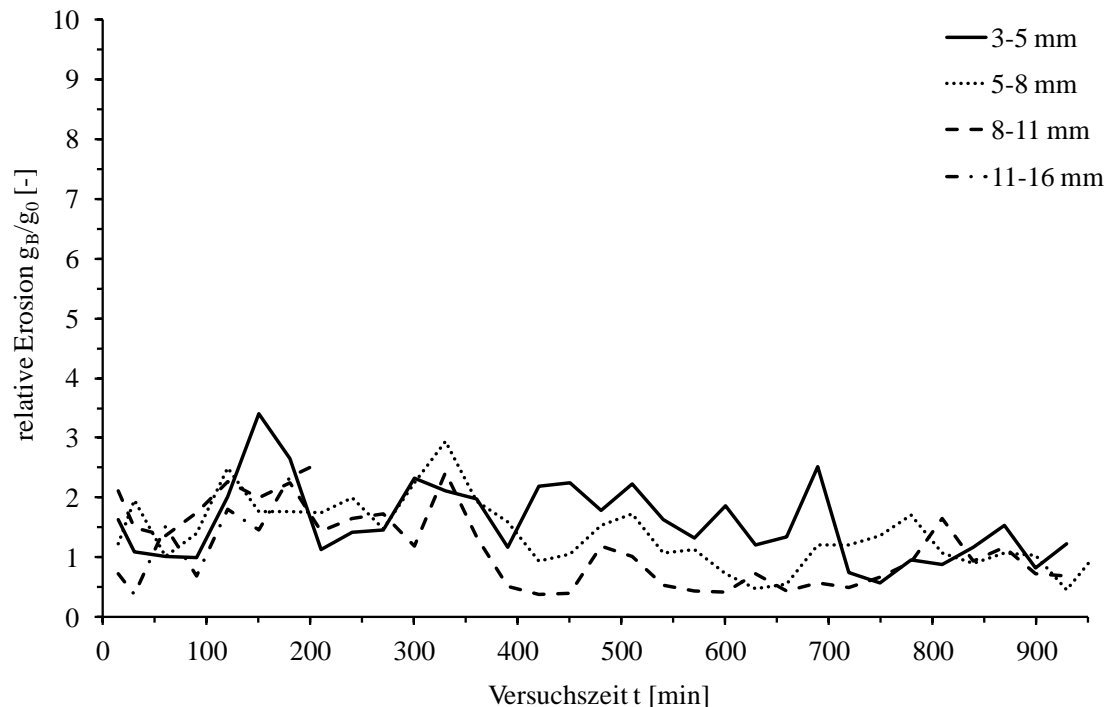


Abb. 6.31: Relative Erosion von Deckschichtmaterial während der Tracerversuche über Z_{X1} bei $\tau_0 = 10,7 \text{ N/m}^2$

Die Sohlenerosion nimmt ebenfalls mit kleiner werdendem Tracer zu. Der maximale Austrag an Sohlenmaterial wird mit der Tracerfraktion 3-5 mm verursacht. Er beträgt etwa das 3,5-fache des Grundaustrags bei Klarwasserabfluss. Das Niveau des Grundaustrags wird mit der Tracergröße $d_T = 3-5 \text{ mm}$ nach ca. 690 min und mit $d_T = 5-8 \text{ mm}$ nach ca. 360 min wieder erreicht. In dem Versuch mit $d_T = 8-11 \text{ mm}$ nimmt der Austrag von Deckschichtmaterial nach ca. 330 min ab. Auch für die Versuche mit $\tau_0 = 10,7 \text{ N/m}^2$ kann anhand der gemessenen Sedimentausträge nicht auf einen signifikanten, nachhaltigen Einfluss des Transports der Tracer auf die Stabilität der Deckschicht geschlossen werden. Der Austrag von Deckschichtmaterial normalisierte sich wieder auf das Niveau des Grundaustrags, nachdem der Transport des Tracers nahezu zum Erliegen kam.

Für die Versuche mit der Deckschicht D_{X2} konnte keine signifikante Erhöhung des Geschiebeaustrags festgestellt werden. Die Austragsmengen entsprachen $g_B \approx 0$ bis $180 \text{ g/m}\cdot\text{h}$ und unterlagen sehr großen Schwankungen, die in der Größenordnung der Schwankungen des Grundaustrags lagen. Ein Einfluss des Transports des Tracers auf die Stabilität dieser Deckschicht konnte hieran nicht festgestellt werden.

6.6 Diskussion der Versuchsergebnisse

In diesem Abschnitt werden die in Kap. 6.5 dargelegten Versuchsergebnisse der in den Kap. 6.1 bis 6.4 erläuterten Versuche zusammengeführt und diskutiert.

In den Untersuchungen zum Ausbreitungsvorgang der Tracer auf den Deckschichten wurde davon ausgegangen, dass der Transport von Sohlenmaterial auch bei dem Transport von externem Geschiebe nur eine zu vernachlässigende Rolle spielt. Zur Überprüfung dieser Annahme wurde das aus den Versuchsrinnen ausgetragene Geschiebe aufgefangen und analysiert. Während der Tracerversuche wurden nur geringfügige Mengen an Deckschichtmaterial mobilisiert und abtransportiert. Mit Bezug auf die von Parker und Klingeman (1982) als Grenze für den Bewegungsbeginn von Deckschichten definierte dimensionslose Referenztransportrate W_r^* zeigte sich, dass in allen Versuchen die Deckschicht als stabil angesehen werden konnte. Dennoch wurde in den Versuchen eine von der Korngröße des Tracers abhängige Zunahme der Sohlenerosion beobachtet. Insgesamt werden also die bereits vorhandenen Erkenntnisse aus der Literatur dahingehend bestätigt, dass Deckschichtmaterial durch einen Geschiebetrieb auch dann mobilisiert werden kann, wenn die kritische Sohlenschubspannung durch die Strömung noch nicht erreicht ist (Hassan & Church, 2000; Jackson & Beschta, 1984; Koll, 2002, 2004; Venditti et al., 2010a, b). Die von Koll (2002) und Venditti et al. (2010b) beobachtete Zunahme des Einflusses auf die Sohlenstabilität mit kleiner werdender Korngröße des Zugabematerials wird ebenfalls bestätigt (vgl. Kap. 2.2.1).

Die Variationen der Versuchsparameter (vgl. Tab. 6.6) führen zu einem Gesamtbild der Einflussfaktoren auf die Ausbreitung einer Tracerbarre auf einer statischen Deckschicht. Der Transport kann dabei als eine Kombination von Advektion (mittlere Transportgeschwindigkeit) und Dispersion (Ausbreitung der Tracerverteilung über der Deckschicht) verstanden werden. Mit steigendem Strömungsangriff τ_0 nimmt auch die Transportgeschwindigkeit des Tracers zu. Weiterhin ergaben die Versuche, dass die Transportgeschwindigkeit mit kleiner werdender Korngröße, also mit kleiner werdender kritischer Schubspannung der Tracer $\tau_{0c,T}$ zunimmt. Dieser Zusammenhang wurde ebenfalls in den Feldstudien von Gölz & Trompeter (2002), Faulhaber & Riehl (2001), Ferguson & Hoey (2002), Ferguson & Wathen (1998) und Ferguson et al. (2002) beobachtet. In diesen Untersuchungen wurde allerdings nicht nur der Tracer, sondern auch das Sohlenmaterial durch den Strömungsangriff transportiert. In der Arbeit von Sklar et al. (2009), in der der Einfluss der Korngröße und der Tracermenge auf die Transportgeschwindigkeit von Geschiebe über statischen Deckschichten untersucht wurde, wird der Zusammenhang der Korngröße mit der Transportgeschwindigkeit ebenfalls bestätigt.

In den Versuchen wurde weiterhin festgestellt, dass die Transportgeschwindigkeit der Tracer proportional zu dem Kehrwert der Versuchszeit abnimmt. Die Abnahme der Transportgeschwindigkeit mit der Beobachtungszeit wurde in unterschiedlicher Ausprägung ebenfalls in Untersuchungen mit bewegter Sohle festgestellt (Ferguson et al., 2002; Gölz & Trompeter, 2001; Promny, 2008a, b), in denen als Ursache hierfür eine vertikale Durchmischung der Tracer mit der Deckschicht als verantwortlich betrachtet wurde. Dementgegen wurde in den vorgestellten Laborversuchen dieser Arbeit, ebenso wie in den Laborversuchen von Sklar et al. (2009), keine signifikante Durchmischung der Tracer mit dem Sohlenmaterial beobachtet, so dass hierin nicht die Ursache für die Geschwindigkeitsabnahme liegen kann. Vielmehr hat sich gezeigt, dass sich der Tracer mit der Versuchszeit auf der Deckschicht ausbreitet. Durch die Ausbreitung nimmt die Flächenkonzentration der Tracer und damit einhergehend die Mobilität des externen Materials ab. Weiterhin wurde festgestellt, dass die Tracer selbst bei größerem Strömungsangriff über eine gröbere Deckschicht insgesamt langsamer transportiert werden als bei einer feineren Sohlenoberfläche. Es ist zu vermuten, dass durch die Ausbreitung und die raue Sohlenstruktur die kritische Schubspannung des Tracers, analog zu dem in Abschnitt 2.1.2 beschriebenen Einfluss des relativen Herausragens eines Korns, größer wird, was zu einer abnehmenden Mobilität der Tracer führt. Als weiterer Einfluss auf die Mobilität des Tracers wurde die Zugabemenge identifiziert. Mit zunehmender Zugabemenge steigt auch die Transportgeschwindigkeit. Dies wird ebenfalls von Sklar et al. (2009) festgestellt.

In einem Zusatzversuch wurde der Transport eines Korngemischs über eine statische Deckschicht untersucht. Die mittlere Transportgeschwindigkeit des gesamten Gemischs entsprach der eines Einkornmaterials mit gleichem mittlerem Durchmesser. In der differenzierten Betrachtung der einzelnen Kornfraktionen wurde allerdings festgestellt, dass die feineren Kornanteile den gröberen Körnern zunächst voranliefen und das Lückensystem der Sohlenoberfläche verfüllten. Auf der dadurch geglätteten Sohle wurden die nachfolgenden gröberen Tracer weiter transportiert als die feineren. Die Transportweite nahm also, im Widerspruch zu den Versuchen für die einzelnen Tracerfraktionen, mit der Korngröße zu. Das Transportverhalten einer Fraktion in einem Kiesgemisches kann also nicht mit dem Transportverhalten der gleichen, getrennt transportierten Fraktion beschrieben werden.

Die Tracerausbreitung bzw. die Dispersion mit voranschreitendem Transport wird in Übereinstimmung mit Gölz & Trompeter (2001) als Verhältnis der Transportweite der Tracerfront zur mittleren Transportweite beschrieben. Hierdurch ist ein Maß dafür gegeben, wie sich die Dispersion der Tracer mit der Versuchszeit entwickelt. Gölz & Trompeter (2001) stellten für das Verhältnis der Transportweite der Tracerfront zu der mittleren Transportweite fest, dass die

Front etwa doppelt so schnell voranschreitet wie der Schwerpunkt der Tracerverteilung. Aus den in Abschnitt 6.1-6.5 beschriebenen Experimenten geht demgegenüber hervor, dass die Dispersion eine Funktion der Korngröße des Tracers, des Strömungsangriffs und der Deckschichteigenschaften ist.

Die empirischen Ansätze von Ferguson et al. (2002) und Wong et al. (2007) berücksichtigen die oben genannten Einflussfaktoren bei der Berechnung der mittleren Transportgeschwindigkeit nur unvollständig. In Gl. (3.10) von Ferguson et al. (2002) ist die Transportgeschwindigkeit eine Funktion des Strömungsangriffs auf ein Korn in Form der dimensionslosen Schubspannung τ^* und des Einflusses der Sohlenoberfläche, ausgedrückt durch das Verhältnis der Tracergröße d_T zur charakteristischen Korngröße der Sohle d_{50b} . Weiterhin stellen Ferguson et al. (2002) eine Abnahme der Geschwindigkeit mit der Zeit fest. Sie berücksichtigen diesen Umstand durch eine Veränderung der empirischen Parameter ihrer Formel für unterschiedliche Beobachtungszeiträume. Eine differenzierte Berücksichtigung der Versuchszeit ist damit nicht möglich. Die in Gl. (3.11) gegebene Beziehung zur Berechnung der Transportgeschwindigkeit von Wong et al. (2007) ist lediglich eine Funktion der Differenz zwischen der dimensionslosen Schubspannung τ^* und dem Shields-Parameter τ_c^* . In Abb. 6.32 sind exemplarisch die Versuchsergebnisse für die mittlere Transportgeschwindigkeit der Tracerversuche mit $d_T = 3-5$ mm sowie $d_T = 5-8$ mm mit der Deckschicht Z_{X1} und einer Schubspannung von $\tau_0 = 9,3$ N/m² gemeinsam mit den Berechnungsergebnissen aus den Gleichungen von Ferguson et al. (2002) und Wong et al. (2007) als Funktion der Versuchszeit dargestellt. Die Transportgeschwindigkeiten sind dabei über die gesamte Versuchszeit gemittelt und als dimensionslose Geschwindigkeit u_G^* nach Gl. (3.12) angetragen. Die Darstellung verdeutlicht, dass keiner der beiden Funktionen die Instationarität des Ausbreitungsvorgangs der Tracermengen beschreiben kann. Weiterhin wird durch die Gleichung von Wong et al. (2007) die Transportgeschwindigkeit weit überschätzt. Die Funktion von Ferguson et al. (2002) liegt etwa in der Größenordnung der Versuchsergebnisse, gibt aber ebenfalls nicht die Abnahme der Transportgeschwindigkeiten mit zunehmender Versuchszeit wieder.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass sich in der Literatur bisher kein Ansatz findet, der die verschiedenen Einflussfaktoren in ausreichendem Umfang berücksichtigt und damit in der Lage wäre, das in dieser Arbeit untersuchte hochgradig instationäre Transportereignis zu beschreiben. Für die Beschreibung der Ausbreitung einer limitierten Geschiebemenge über einer statischen Deckschicht müssen die mittlere Geschwindigkeit und die Dispersion der Tracer durch eine Funktion der Korngröße d_T des Tracers, des Strömungsangriffs τ_0 , der Charakteris-

tika der Deckschicht, der Tracermasse M_T und der Verlauf über der Versuchszeit t berücksichtigt werden.

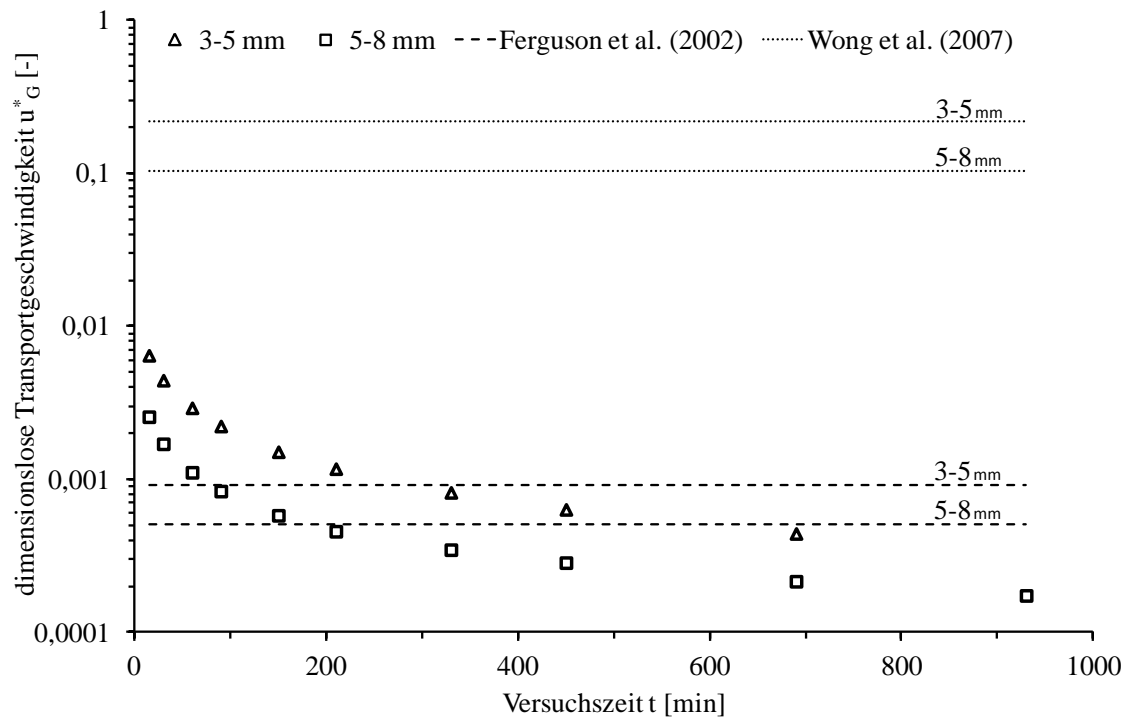


Abb. 6.32: Vergleich der mittleren dimensionslosen Transportgeschwindigkeit aus den Versuchen u_G^* ($d_T = 3\text{-}5, 5\text{-}8\text{ mm}$, Z_{X1} , $\tau_0 = 9,3\text{ N/m}^2$) mit den Gleichungen von Ferguson et al. (2002) und Wong et al. (2007)

In Kap. 7 wird, aufbauend auf die Dimensionsanalyse in Kap. 5, eine empirische Beziehung zur Beschreibung der Tracerausbreitung unter Berücksichtigung der genannten Parameter hergeleitet.

7 Datenanalyse und Ableitung einer empirischen Beziehung

Für die mathematische Beschreibung des Ausbreitungsvorgangs einer limitierten externen Geschiebemenge müssen die hydraulischen Parameter (Strömungsangriff) sowie die sedimentologischen Eigenschaften des externen Geschiebes (Korngröße, Feststoffdichte, Menge des Zugabematerials) und der Sohlenoberfläche der Deckschicht (z.B. charakteristischer Korndurchmesser oder Standardabweichung) sowie der zeitliche Verlauf des Transportprozesses berücksichtigt werden. Für die mittlere dimensionslose Geschwindigkeit u_G^* (Gl. 5.13) wurde mit Gl. (5.14) ein universeller Zusammenhang formuliert. Im Folgenden soll anhand dieser Beziehung und der Versuchsergebnisse eine empirische Gleichung formuliert werden. Weiterhin wird ein erster Ansatz für die Beschreibung der Dispersion entwickelt. Im Anschluss daran wird das Ergebnis der Datenanalyse diskutiert.

7.1 Funktionale Zusammenhänge der Π -Parameter mit der dimensionslosen Transportgeschwindigkeit

Die funktionalen Zusammenhänge der mittleren Transportgeschwindigkeit mit den Π -Parametern in Gl. (5.14) werden anhand der Versuche mit den Deckschichten Z_{X1} und Z_{X3} abgeleitet und es wird eine zusammenfassende empirische Beziehung formuliert. Die Überprüfung der Gleichung erfolgt anhand der Versuche mit der Deckschicht D_{X2} , die ein vollständig von den übrigen Versuchen losgelöstes System darstellen. Weiterhin werden Ergebnisse aus der Literatur mit dem Ergebnis dieser Arbeit verglichen.

7.1.1 Einfluss der Tracermenge

Die Tracermasse M_T wird in Gl. (5.14) als dimensionslose Tracermenge je Breitereinheit m_T^* (Gl. 5.9) berücksichtigt. Der Einfluss der Tracermenge wurde anhand der Versuche mit der Deckschicht Z_{X3} (Abschnitt 6.3.1, 6.5.3) untersucht. In diesen Versuchen wurde lediglich die Tracermasse M_T variiert. Das bedeutet, dass die Auswirkungen des Strömungsangriffs, der Korngröße und der Deckschicht auf die Transportgeschwindigkeit bei der Auswertung des Einflusses der Tracermenge vernachlässigt werden können. In Abb. 7.1 sind die dimensionslosen Transportgeschwindigkeiten u_G^* , die nach Gl. (5.13) aus den mittleren Transportgeschwindigkeiten in den Versuchen K01-K06 (vgl. Tab. 6.6) mit $d_T = 3-5$ mm berechnet wurden, als Funktion der dimensionslosen Tracermenge m_T^* für die Zeitschritte nach 30, 60 und 90 min dargestellt. Es zeigt sich für alle drei Zeitschritte, dass die Transportgeschwindigkeit mit zunehmender Tracermenge zunimmt. Die Versuchsergebnisse unterliegen einer natürli-

chen Fluktuation, die auf zufallsgesteuerte Einflüsse aus der Turbulenz der Strömung und der Oberflächenstruktur der Sohle zurückzuführen sind (vgl. Kap. 6). Insgesamt zeigt sich, dass für den Variationsbereich der Tracermasse bzw. -menge ein linearer Zusammenhang zwischen der dimensionslosen Tracermenge und der dimensionslosen Transportgeschwindigkeit angenommen werden kann.

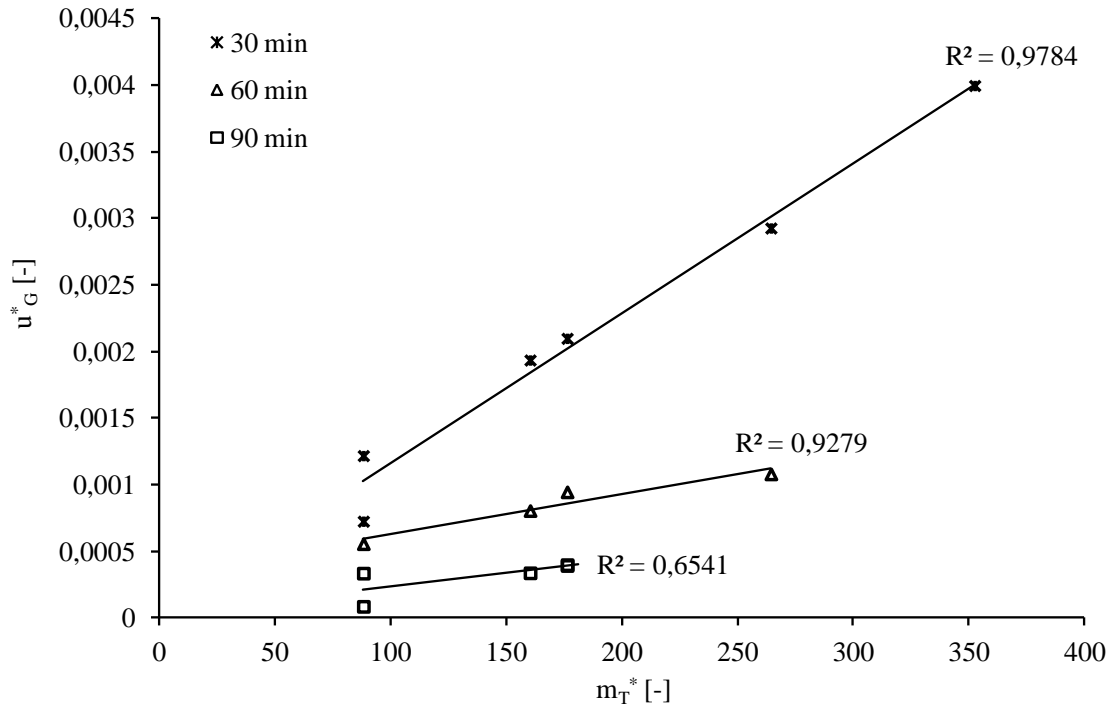


Abb. 7.1: Dimensionslose Transportgeschwindigkeit als Funktion der dimensionslosen Tracermenge mit $d_T = 3-5$ mm, Z_{X3} und $\tau_0 = 6,4$ N/m²

Für die Berücksichtigung der dimensionslosen Tracermenge ergibt sich damit folgende lineare Beziehung:

$$u_G^* = f \left(a_1 \cdot \left(\frac{m_T}{\rho_s \cdot d_T^2} \right)^1 \right). \quad (7.1)$$

7.1.2 Einfluss des Strömungsangriffs und der Korngröße der Tracer

Der Strömungsangriff und die Korngröße des Tracers werden in Gl. (5.14) durch die dimensionslose Sohlenschubspannung τ_T^* erfasst, die nicht auf einen charakteristischen Korndurchmesser der Sohlenoberfläche, sondern auf die Korngröße der Tracer bezogen ist. In den Versuchen H01-H10 (vgl. Tab. 6.6) mit der Deckschicht Z_{X1} (Abschnitte 6.3.1, 6.5.1) wurde die Tracergröße ($d_T = 1-3, 3-5, 5-8, 8-11$ und $11-16$ mm) und der Strömungsangriff ($\tau_0 = 9,3$ N/m² und $\tau_0 = 10,7$ N/m²) variiert. Beide Einflussgrößen führen zu einer Veränderung der dimensi-

ensionslosen Sohlenschubspannung. Für die Untersuchung des funktionalen Zusammenhanges mit der dimensionslosen Transportgeschwindigkeit werden die Messergebnisse der Versuche H01-H10 getrennt nach den einzelnen Messzeitpunkten betrachtet.

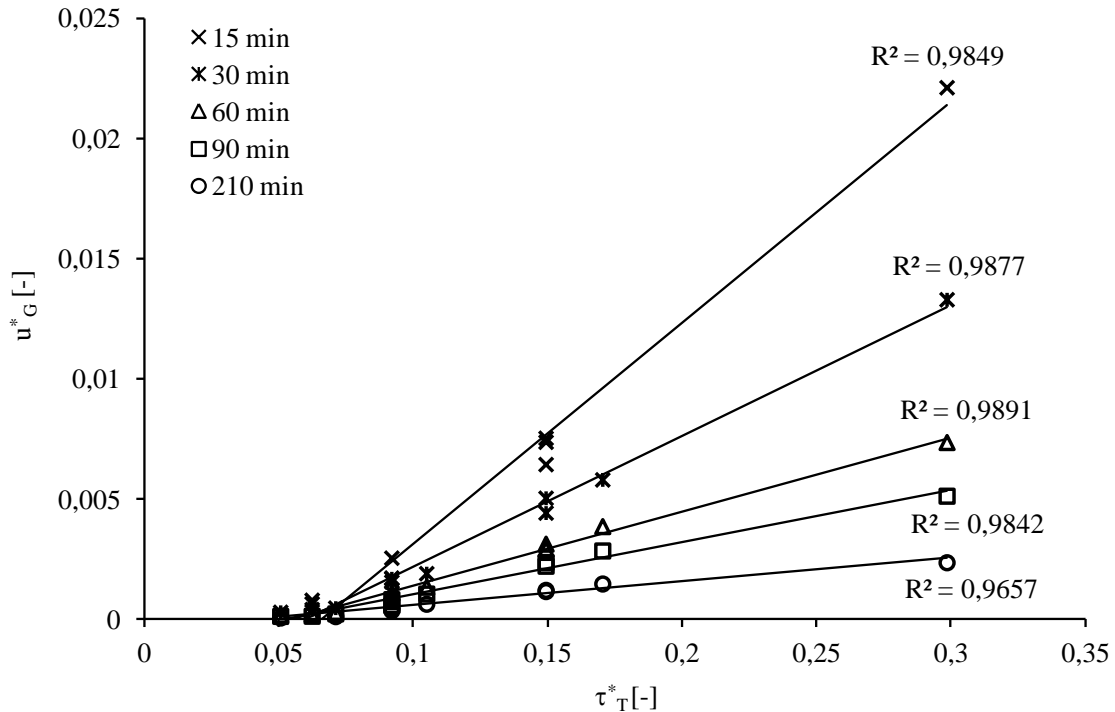


Abb. 7.2: Dimensionslose Transportgeschwindigkeit in den Versuchen H01-H10 als Funktion von τ_T^*

In Abb. 7.2 ist auf der x-Achse die dimensionslose Schubspannung τ_T^* , bezogen auf d_T , und auf der y-Achse die dimensionslose Transportgeschwindigkeit u_G^* angetragen. Dargestellt sind die fünf Zeitschritte 15, 30, 60, 90 und 210 min. Für die Transportgeschwindigkeit zeigt sich ein linearer Zusammenhang mit τ_T^* mit sehr hohen Korrelationskoeffizienten. Dementsprechend ergibt sich folgende Beziehung:

$$u_G^* = f \left(a_2 \cdot \left(\frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot I}{(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d_T} \right)^1 \right). \quad (7.2)$$

7.1.3 Einfluss der Versuchszeit

Die in Abschnitt 6.3 dargelegten Versuchsergebnisse zeigen, dass die Transportgeschwindigkeit umgekehrt proportional zu der zunehmenden Versuchszeit, also proportional zu $1/t^*$, zunimmt. Für die Analyse des funktionalen Zusammenhanges der Versuchszeit mit der Transportgeschwindigkeit werden die Versuche mit der Deckschicht Z_{X1} ausgewertet. In diesen wurden die Korngröße der Tracer und der Strömungsangriff variiert. Abhängig von der Tra-

cerfraktion fand ebenfalls eine leichte Variation der Tracermasse statt, da das Tracervolumen konstant gehalten wurde. Zur gemeinsamen Auswertung der Versuchsergebnisse werden die Einflüsse der Tracermasse und der dimensionslosen Schubspannung aus den Versuchsergebnissen entsprechend der vorangehend festgestellten funktionalen Zusammenhänge eliminiert. Hierzu wird die gemessene dimensionslose Transportgeschwindigkeit u_G^* durch die dimensionslose Tracermenge m_T^* und den Shields-Parameter τ_T^* geteilt. In Abb. 7.3 ist dieser Quotient als Funktion der dimensionslosen Versuchszeit t^* für die Versuche H01- H10 (vgl. Tab. 6.6) dargestellt. Entsprechend des bereits festgestellten umgekehrt proportionalen Zusammenhangs mit der Versuchszeit ist auf der x-Achse der Kehrwert von t^* dargestellt.

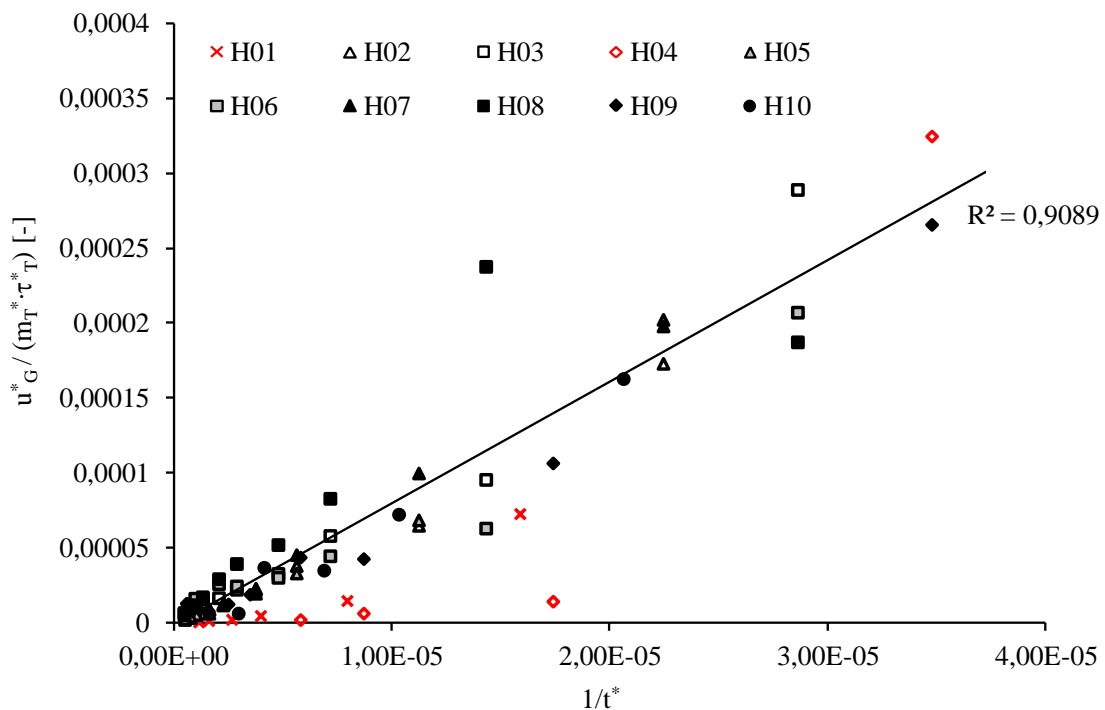


Abb. 7.3: $u_G^*/(m_T^* \cdot \tau_T^*)$ als Funktion von $1/t^*$ mit $d_T = 1-3, 3-5, 5-8, 8-11$ und $11-16$ mm, Z_{X1} sowie $\tau_0 = 9,3$ und $10,7$ N/m²

In dem Diagramm fallen die Datenpunkte der Versuche H01 ($d_T = 1-3$ mm, $\tau_0 = 9,3$ N/m²) und H04 ($d_T = 8-11$ mm, $\tau_0 = 9,3$ N/m²) aus den restlichen Daten heraus. Beiden Versuchen ist gemeinsam, dass die Tracergeschwindigkeit nach der anfänglichen Ausbreitung der Tracerbarre in den ersten 15 min des Versuchs sehr stark abnimmt. Im Versuch H01 kann dies auf den schnellen Einbau des Tracers in die Sohlenoberfläche zurückgeführt werden. In Versuch H04 wurde die kritische Schubspannung des Tracers nur geringfügig überschritten und der Transport kam daher sehr schnell nahezu zum Erliegen. Für die weitere Auswertung werden deshalb die Datenpunkte für die Versuchszeiten $t > 15$ min ausgeschlossen. Für die restlichen Daten zeigt sich trotz der verhältnismäßig starken Fluktuation der Versuchsergebnisse,

die bereits anhand der in Abschnitt 6.3 dargestellten Kurven für die Transportgeschwindigkeiten erläutert wurde, ein linearer Zusammenhang zwischen dem Quotienten $u_G^*/(m_T^* \cdot \tau_T^*)$ und dem Kehrwert $1/t^*$. Demzufolge kann für die Versuchszeit folgender funktionale Zusammenhang festgehalten werden:

$$u_G^* = f \left(a_3 \cdot \left(t \cdot \sqrt{\frac{g}{d_T}} \right)^{-1} \right). \quad (7.3)$$

7.1.4 Einfluss der Deckschicht

Die Versuche haben gezeigt, dass abhängig von der Deckschicht unterschiedliche Transportgeschwindigkeiten auftreten. Die Ursache hierfür ist darin zu sehen, dass sich die Tracer während ihrer Ausbreitung auf der rauen Sohlenoberfläche ablagern und abhängig von ihrem relativen Herausragen aus der Deckschicht ein unterschiedlicher Strömungsangriff erforderlich ist, um diese zu transportieren. Dies wiederum führt dazu, dass während der gleichen Versuchszeit ein geringerer Anteil der Tracer transportiert wird. Der Einfluss der Deckschicht wird anhand der Versuchsergebnisse mit den Deckschichten Z_{X1} und Z_{X3} untersucht. Hierzu lässt sich mit den bereits festgestellten Zusammenhängen und dem Term zur Berücksichtigung der Sohlenstruktur $d^* = d_T/d_S$ folgende Gleichung zur Berechnung der mittleren dimensionslosen Transportgeschwindigkeit formulieren:

$$u_G^* = a_{1-3} \cdot \frac{\frac{m_T}{\rho_S \cdot d_T^2} \cdot \frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot I}{(\rho_S - \rho) \cdot g \cdot d_T}}{t \cdot \sqrt{\frac{g}{d_T}}} \cdot a_4 \cdot \left(\frac{d_T}{d_S} \right)^{b_4}. \quad (7.4)$$

In Abb. 7.4 sind die Versuchsergebnisse für die dimensionslose Transportgeschwindigkeit der Versuche H01-H10 und K01-K06 als Funktion von Gl. (7.4) unter Vernachlässigung der Konstanten a_{1-3} und a_4 sowie des Ausdrucks d_T/d_S dargestellt. Wie in dem vorherigen Abschnitt zur Bestimmung des Einflusses der Versuchszeit ist in dem Diagramm deutlich zu erkennen, dass die Daten der Versuche H01 und H04 nicht durch den gezeigten funktionalen Zusammenhang wiedergegeben werden. Entsprechend der vorangehenden Vorgehensweise werden diese Versuche von der Auswertung ausgenommen. Für die in der Analyse verbleibenden Versuche zeigt sich allerdings sowohl für H02-H10, als auch für K01-K06, dass diese durch die Funktion $(m_T^* \cdot \tau_T^*)/t^*$ gut repräsentiert werden. Die Ausgleichsgeraden der beiden Versuchsgruppen indizieren, dass bereits ohne Berücksichtigung des Terms d_T/d_S eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse vorliegt.

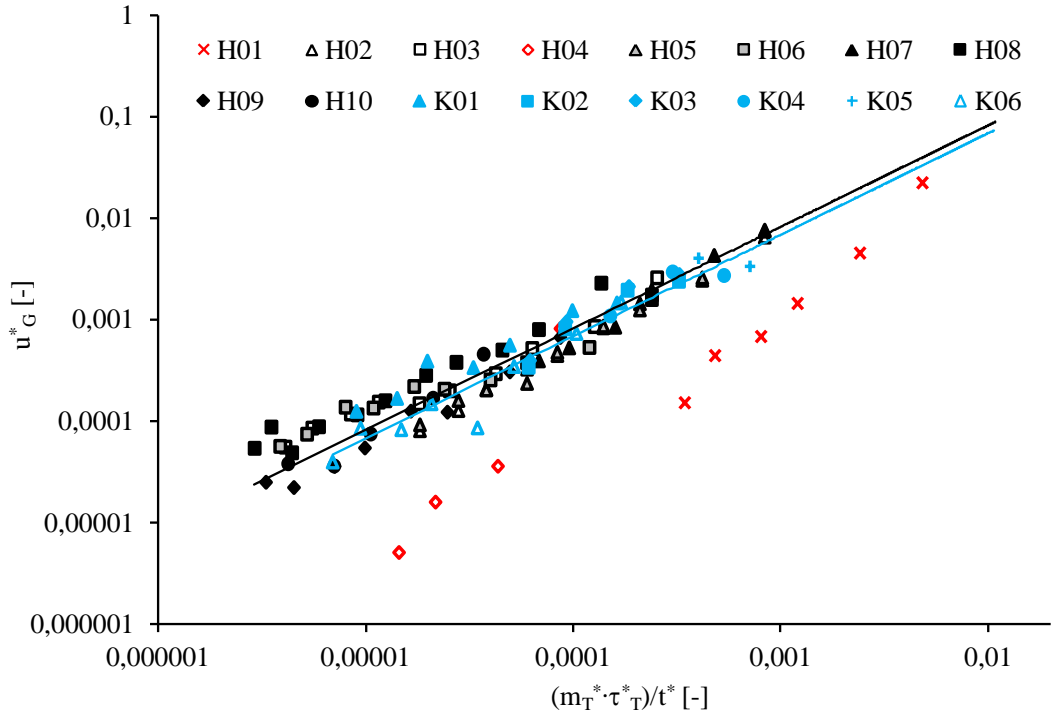


Abb. 7.4: u_G^* als Funktion von $(m_T^* \cdot \tau_T^*)/t^*$ für die Versuche H01-H10 und K01-K06

Aufgrund der Fluktuation der Versuchsdaten und der Tatsache, dass lediglich zwei verschiedene Deckschichten die Grundlage für die dargestellten Versuche sind, wurde der Exponent b_4 in Gl. (7.4) durch eine Parameteranpassung bestimmt. Für die Charakterisierung der Deckschicht wurde der Korndurchmesser $d_{50,s}$ gewählt. Die vollständige Überlagerung der Ausgleichsgeraden ergibt sich damit mit $b_4 = -0,21$. Für den vierten Term d^* , der eine Entsprechung zu den Ansätzen der relativen Exponiertheit eines Korns in Mischsohlen (vgl. Abschnitt 2.1.2) darstellt, ergibt sich also folgender funktionale Zusammenhang mit der dimensionslosen Transportgeschwindigkeit:

$$u_G^* = f \left(a_4 \cdot \left(\frac{d_T}{d_{50,s}} \right)^{-0,21} \right). \quad (7.5)$$

7.1.5 Formulierung und Überprüfung der empirischen Beziehung für die dimensionslose Transportgeschwindigkeit

Die funktionalen Zusammenhänge der dimensionslosen Parameter m_T^* , τ_T^* , t^* und d^* wurden vorangehend bestimmt. Zusammenführend kann damit die folgende Beziehung aufgestellt werden:

$$u_G^* = a \cdot \frac{\frac{m_T}{\rho_s \cdot d_T^2} \cdot \frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot I}{(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d_T}}{t \cdot \sqrt{\frac{g}{d_T}} \cdot \left(\frac{d_T}{d_{50,s}}\right)^{0,21}}. \quad (7.6)$$

Die Konstante a kann damit durch eine lineare Regression für die Versuche auf den Deckschichten Z_{X1} und Z_{X3} bestimmt werden. Daraus ergibt sich a zu 5,58. Für die Beschreibung des Ausbreitungsverhaltens einer limitierten externen Geschiebemenge auf einer statischen Deckschicht ergibt sich also die empirische Formel für die mittlere Transportgeschwindigkeit, die anhand der Dimensionsanalyse und der Versuchsdaten ermittelt wurde, zu:

$$u_G^* = \frac{u_T}{\sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot g \cdot d_T}} = 5,58 \cdot \frac{\frac{m_T}{\rho_s \cdot d_T^2} \cdot \frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot I}{(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d_T}}{t \cdot \sqrt{\frac{g}{d_T}} \cdot \left(\frac{d_T}{d_{50,s}}\right)^{0,21}}. \quad (7.7)$$

Die alternative Schreibweise unter Verwendung der in Kap. 5 definierten Bezeichnungen der dimensionslosen Parameter lautet:

$$u_G^* = 5,58 \cdot m_T^* \cdot \tau_T^* \cdot t^{*-1} \cdot d^{*-0,21}. \quad (7.8)$$

Das Resultat ist eine Formel, mit der die mittlere dimensionslose Transportgeschwindigkeit u_G^* nach einer Beobachtungszeit t unter Berücksichtigung der Zugabemenge, des Strömungsangriffs, der Korngröße des externen Materials und des Einflusses der Deckschicht bestimmt werden kann. Durch eine Umformung der Gleichung 7.7 kann direkt die mittlere Transportgeschwindigkeit u_T bestimmt werden. Für die Anwendung der Formel sind die in Tab. 5.1 zusammengefassten Variationsbereiche der Eingangsgrößen als derzeitig untersuchter Gültigkeitsbereich zu betrachten. Auch wenn von einer über diese Untersuchungsgrenzen hinausgehenden Gültigkeit auszugehen ist, ist die Anwendbarkeit für Eingangswerte außerhalb dieses Untersuchungsbereichs zu überprüfen.

Zur Validierung werden die Ergebnisse der Versuche mit der Deckschicht D_{X2} (Abschnitt 6.5.2) und mit Versuchsergebnissen aus der Literatur mit Gl. (7.7) verglichen. Die Versuchsgruppe H11-H14 mit der Deckschicht D_{X2} unterschied sich von den Versuchen, die der Datenanalyse zugrunde lagen, sowohl in der verwendeten Deckschicht als auch im Strömungsangriff. Sie stellt damit eine vollständig losgelöste Datengrundlage dar. Aus der Literatur stehen zwei Datensätze für den Vergleich mit Gl. (7.7) zur Verfügung, für die die erforderlichen Eingangsparameter der Formel bestimmt werden können. Dies sind die in Kap. 3.2.2 beschriebenen Versuchsergebnisse von Promny (2008a,b) und von Sklar et al. (2009). Für die

anderen vorgestellten Literaturdaten stehen hierfür leider nicht alle erforderlichen Eingangsparameter zur Verfügung. In Abb. 7.5 sind die Literaturdaten und die Versuche mit D_{X2} der ermittelten empirischen Formel gegenübergestellt. In dem Diagramm sind auf der x-Achse die mittlere, nach Gl. (7.7) berechnete, dimensionslose Transportgeschwindigkeit und auf der y-Achse die nach Gl. (5.13) umgerechneten Versuchsergebnisse angetragen. Die optimale Übereinstimmung zwischen Rechen- und Messergebnissen ist durch die durchgezogene Linie gekennzeichnet. Für die Versuche H12, H13 und H14 zeigt sich eine gute Übereinstimmung der ermittelten empirischen Beziehung. Der Versuch H11 mit $d_T = 3\text{--}5\text{ mm}$ und $\tau_0 = 13,5\text{ N/m}^2$ wird von dieser jedoch nicht wiedergegeben. Vergleichbar mit den Versuchen H01 und H04 wurde eine im Vergleich zu den anderen Experimenten deutlich schnellere Abnahme der Transportgeschwindigkeit mit der Versuchszeit beobachtet (vgl. Kap. 6.5). Insgesamt kann festgestellt werden, dass 17 der 20 Einzelversuche durch die ermittelte Gleichung gut wiedergegeben werden und dass die anhand der Versuchsgruppen H01-H10 und K01-K06 ermittelten funktionalen Zusammenhänge grundsätzlich auch auf die Versuche mit der Deckschicht D_{X2} übertragen werden können.

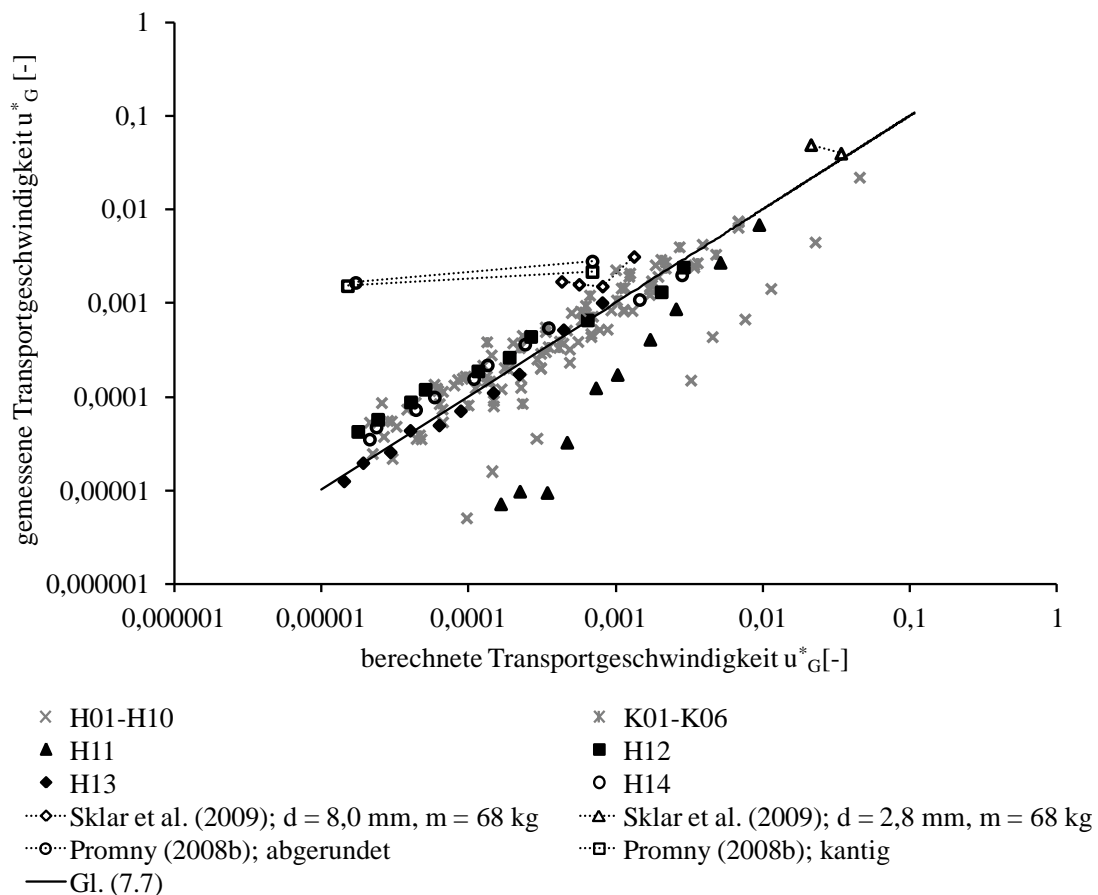


Abb. 7.5: Vergleich der mit Gl. (7.7) berechneten dimensionslosen Transportgeschwindigkeit mit den Versuchsergebnissen mit der Deckschicht D_{X2} und mit Literaturdaten

Die Laborexperimente von Promny (2008a, b) wurden mit einer vollständig mobilen Sohle durchgeführt. Das bedeutet, dass der Tracer gemeinsam mit dem Sohlenmaterial transportiert wurde (vgl. Abschnitt 3.2.2). Zu Beginn der Ausbreitung weisen die Tracer in den Versuchen von Promny (2008a, b) eine Transportgeschwindigkeit auf, die in der Größenordnung den Ergebnissen der in Kap. 6.5 beschriebenen Versuche entspricht. Die beiden Messpunkte, die zum Ende der Versuche aufgenommen wurden, zeigen jedoch im Gegensatz zu den Versuchsergebnissen dieser Arbeit, keine signifikante Verlangsamung der Tracer auf. Die Ursache hierfür ist in der vollständig mobilen Sohle zu sehen. Die Tracer werden in diesem Fall mit der gleichen Geschwindigkeit wie das Sohlenmaterial abtransportiert und unterliegen keiner Verzögerung infolge der limitierten Verfügbarkeit.

In den Versuchen von Sklar et al. (2009) wurde der Tracer nicht auf der Sohlenoberfläche platziert, bevor der Durchfluss eingestellt wurde, sondern er wurde für eine begrenzte Zeitspanne in Form einer konstanten Zugaberate zugeführt. Die Zugabemenge wurde dabei durch die Dauer der Zugabe variiert. Für den Vergleich der Versuchsergebnisse von Sklar et al. (2009) mit den Resultaten dieser Arbeit wurden nur die Tracergeschwindigkeiten berücksichtigt, die nach Abschluss der jeweiligen Geschiebezugabe und vor dem Überschreiten des unterstromigen Endes der Versuchssohle durch die Tracerfront ermittelt wurden. Deshalb können an dieser Stelle lediglich zwei Versuche mit einer Zugabemenge von jeweils 68 kg für den Vergleich herangezogen werden. Die Tracergröße betrug in diesen Versuchen $d_T = 2,8 \text{ mm}$ bzw. $d_T = 8 \text{ mm}$. Die Transportgeschwindigkeiten mit dem Tracermaterial $d_T = 8 \text{ mm}$ fallen mit den Ergebnissen aus der vorliegenden Studie zusammen und werden dementsprechend gut durch Gl. (7.7) wiedergegeben. In den Experimenten mit den kleineren Tracern ($d_T = 2,8 \text{ mm}$) wurden höhere Transportgeschwindigkeiten als bei den Vergleichsdaten erreicht. Sie stehen direkt in der Verlängerung der gefundenen Beziehung und werden damit ebenfalls gut abgebildet.

7.2 Abschätzung eines funktionalen Zusammenhangs für die Dispersion

Das Verhältnis L_F/L_S der Transportweiten der Tracerfront und der mittleren Transportweiten ist ein geeignetes Maß zur Beschreibung der Dispersion der Tracer. Anhand dieses Verhältnisses kann direkt die Längsausdehnung der Tracerverteilung und das mittlere Verhältnis der Transportgeschwindigkeiten von Front und Schwerpunkt der Tracerverteilung abgelesen werden. In der Versuchsauswertung in Kap. 6.5 zeigte sich, dass für L_F/L_S ein Zusammenhang mit der Korngröße und dem Strömungsangriff vorliegt. Ein Zusammenhang mit der Tracermasse bzw. -menge wurde nicht festgestellt. Dementsprechend liegt die Annahme nahe, dass die

Dispersion der Tracer eine Funktion der auf die Tracergröße bezogenen dimensionslosen Schubspannung ist. Aus den Ergebnissen der Versuche H01-H10 mit der Deckschicht Z_{X1} (vgl. Abb. 6.14 und 6.19) geht dabei hervor, dass L_F/L_S mit der Korngröße, d.h. mit kleiner werdender dimensionsloser Schubspannung, zunimmt. Die Versuchsergebnisse haben aber auch gezeigt, dass das Verhältnis der Transportweiten während eines Versuchs teilweise sehr großen Fluktuationen unterliegt. Diese ist für die größeren Korngrößen tendenziell größer als für die kleineren. Um dennoch eine erste Beziehung zur Abschätzung des Dispersionsverhaltens zu formulieren, erfolgt die Auswertung anhand der für jeden Versuch errechneten Mittelwerte von L_F/L_S . Die Ergebnisse aus den Versuchen K01-K06 werden dabei zu einem Mittelwert zusammengefasst.

In Abb. 7.6 ist das Verhältnis als Funktion des Kehrwertes der dimensionslosen Schubspannung aufgetragen. Aus den Versuchen H01-H10 wurde der folgende exponentielle Zusammenhang abgeleitet, der in dem Diagramm als durchgezogene Linie gekennzeichnet ist:

$$\frac{L_F}{L_S} = 1,273 \cdot e^{0,067 \cdot \frac{(\rho_S - \rho) \cdot g \cdot d_T}{\rho \cdot g \cdot h \cdot I}} \quad (7.9)$$

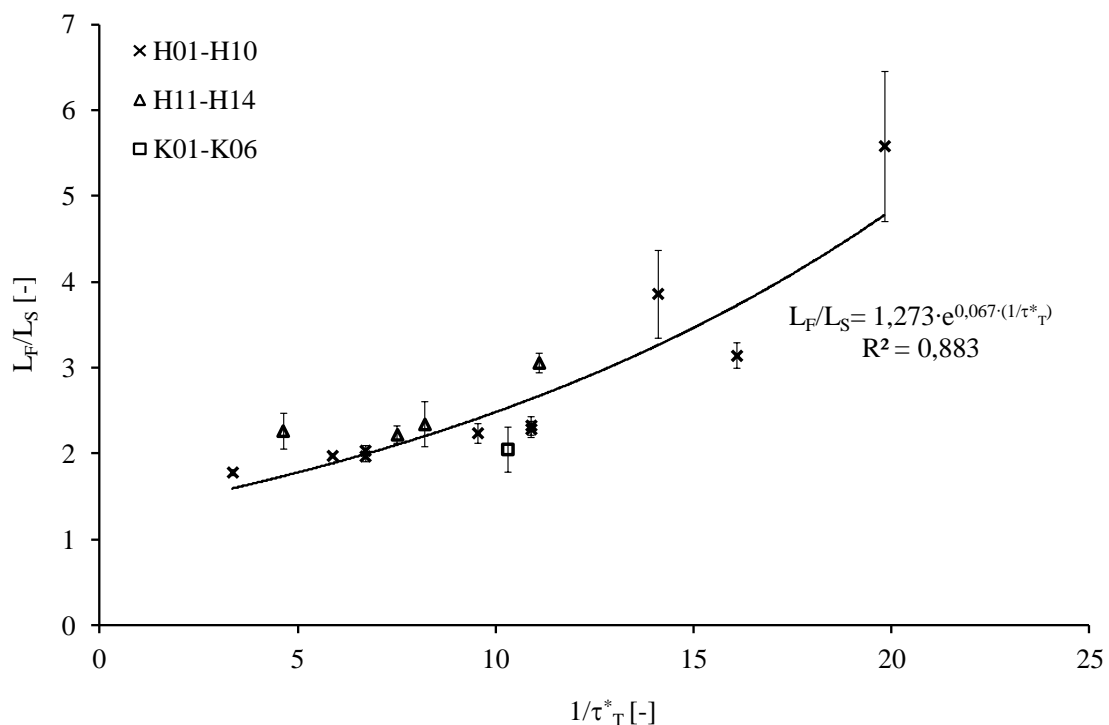


Abb. 7.6 Das Verhältnis der Transportweiten von Tracerfront und -schwerpunkt L_F/L_S als Funktion des Kehrwertes der dimensionslosen Schubspannung $1/\tau_T^*$

Insgesamt kann die Wiedergabe der Versuchsergebnisse für L_F/L_S noch als gut bezeichnet werden, der Abstand der Datenpunkte nimmt jedoch für größere Werte für $1/\tau_T^*$ zu. Der Vergleich mit den Versuchsgruppen H11-H14 (Deckschicht D_{X2}) und K01-K06 (Deckschicht Z_{X3}) zeigt, dass auch diese Daten relativ gut durch Gl. (7.9) repräsentiert werden. Eine weitere Verbesserung der Gleichung durch die Einbindung eines Terms für das relative Herausragen (vgl. Kap. 7.1.4) erfordert weitere Laboruntersuchungen.

7.3 Diskussion der empirischen Gleichung

Die Ausbreitung einer limitierten Geschiebemenge ist ein hochgradig instationärer Prozess, der von der Beobachtungsdauer, der Menge an zugegebenem Material, der Korngröße sowie dem Strömungsangriff abhängig ist. Der Ausbreitungsvorgang lässt sich durch die mittlere Transportgeschwindigkeit und die Zunahme der Dispersion beschreiben. In diesem Abschnitt werden die vorangehend bestimmten empirischen Beziehungen zur Bestimmung der mittleren dimensionslosen Transportgeschwindigkeit (Gl. 7.7) und zur Abschätzung der Zunahme der Dispersion (Gl. 7.9) diskutiert. Mit diesen beiden Gleichungen werden erstmalig empirische Beziehungen formuliert, mit denen sich das Ausbreitungsverhalten einer limitierten Menge externen Geschiebes auf einer statischen Deckschicht beschreiben lässt.

Die Einflussfaktoren auf das Transportverhalten des Zugabematerials werden in der abgeleiteten Gl. (7.7) durch die dimensionslose Tracermenge m_T^* (Gl. 5.8), die auf das Tracerkorn bezogene dimensionslose Schubspannung τ_T^* (Gl. 5.10), die dimensionslose Versuchszeit t^* (Gl. 5.11) und den Term $d_T/d_{50,s}$ beschrieben. Die Gleichung gibt die Transportgeschwindigkeiten der Versuche, mit denen sie entwickelt wurde, und die Versuche H12-H14 sowie die Versuchsergebnisse von Sklar et al. (2009) gut wieder.

Insbesondere anhand der guten Übereinstimmung mit den Versuchen von Sklar et al. (2009) zeigt sich, dass für den dargestellten Wertebereich der Eingangsparameter die Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen der dimensionslosen Sohlenschubspannung und der Tracermenge mit der Transportgeschwindigkeit zutreffend ist. Dennoch ist für beide Einflussfaktoren mit einer begrenzten Gültigkeit der Annahme einer linearen Abhängigkeit zu rechnen. Im Falle der Tracermasse muss sich bei einer weiteren Erhöhung der Zugabemenge ein Punkt finden, ab dem eine maximale Transportgeschwindigkeit erreicht wird, die dann alleinig von den Korneigenschaften und dem Strömungsangriff bestimmt wird und der Geschwindigkeit im Gleichgewichtstransport entspricht. Diese Grenze ist jedoch auch mit den von Sklar et al. (2009) zugegebenen 68 kg Tracer ($m_T = 79 \text{ kg/m}$) noch nicht erreicht. Bezüglich des Einflusses der dimensionslosen Sohlenschubspannung wird die untere Limitierung durch den Bewe-

gungsbeginn des Zugabematerials und die obere Limitierung durch den Punkt, ab dem das externe Material in Suspension geht, gekennzeichnet. Bei dem Transport in Suspension wird die Transportgeschwindigkeit durch die Fließgeschwindigkeit des Fluids vorgegeben.

Die Versuchsergebnisse haben gezeigt, dass eine adäquate Abbildung der Transportprozesse bei der Ausbreitung einer limitierten Geschiebemenge durch die Gleichungen für den stationären Gleichgewichtstransport (vgl. Kap. 3.1) und durch Formeln, die die Abnahme der Transportgeschwindigkeit vernachlässigen (Kap. 3.2), nicht möglich ist. In dieser Arbeit wurde ein umgekehrt proportionaler Zusammenhang der dimensionslosen Transportgeschwindigkeit mit der fortschreitenden Beobachtungsdauer festgestellt, mit dem sich 17 der insgesamt 20 Versuche gut wiedergeben lassen. Weiterhin wurde durch den einfachen Term $d_T/d_{50,s}$ zur Berücksichtigung des relativen Herausragens der Zugabefraktion eine verbesserte Übereinstimmung der Versuchsergebnisse mit der gefundenen empirischen Beziehung erreicht.

Die Annahme der linearen Abhängigkeit der Transportgeschwindigkeit von $1/t^*$ ist eine vereinfachende Darstellung, mit der sich die Mehrzahl der Versuche abbilden lässt. Die Ergebnisse für die mittlere Transportgeschwindigkeit der Versuche H01, H04 und H11 zeigen jedoch, dass diese Beziehung keine universell gültige Aussage hat. Vielmehr ist anzunehmen, dass die Geschwindigkeitsabnahme stattdessen durch die Veränderung des Bewegungsbeginns der Zugabefraktion mit steigender Ausbreitung der Tracer beschrieben werden sollte. Hierauf weist die in Kap. 6.5 festgestellte Abnahme der Transportgeschwindigkeit mit abnehmender Flächenkonzentration der Tracer hin. Zusätzlich zu dem Shields-Parameter τ_T^* sollte also der Einfluss des relativen Herausragens der Tracerkörner aus der Sohlenoberfläche, repräsentiert durch einen Vorfaktor der kritischen Schubspannung τ_c^* , in die Formel zur Berechnung der dimensionslosen Transportgeschwindigkeit eingehen. Dieser Vorfaktor wäre dann wiederum eine Funktion der Tracerkonzentration auf der Sohlenoberfläche, der Charakteristik der Deckschicht und der Korngröße des Zugabematerials. Hierin läge eine Entsprechung zu den Formeln zur Berücksichtigung des relativen Herausragens auf den Bewegungsbeginn (vgl. Kap. 2.1.2). Anhand der vorliegenden Versuchsdaten ist jedoch die Ableitung einer Funktion für den Vorfaktor der kritischen dimensionslosen Sohlenschubspannung nicht möglich. Hierzu sind gezielte Untersuchungen zum Bewegungsbeginn von externem Material auf statischen Deckschichten erforderlich. Die aus der Literatur bekannten Formeln sind für das untersuchte Transportphänomen nicht geeignet.

Entgegen der Ergebnisse von Gölz & Trompeter (2001), die für die Tracerausbreitung einen konstanten, von der Korngröße unabhängigen Wert von $L_F/L_S \approx 2$ gefunden haben, zeigen die

Versuche, dass eine Abhängigkeit des Dispersionsgrades von der Korngröße und von dem Strömungsangriff besteht. Für die Beschreibung des Maßes der Dispersion durch das Verhältnis der Transportweiten von Tracerfront und -schwerpunkt wurde ein einfacher exponentieller Zusammenhang mit der dimensionslosen Sohlenschubspannung formuliert. Durch eine Einbeziehung der oben erläuterten Funktion für die kritische dimensionslose Schubspannung der Tracer sollte eine weitere Verbesserung der Formel für L_F/L_S möglich sein.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Der natürliche Geschiebetrieb in Fließgewässern, in denen sich statische Deckschichten gebildet haben, ist vernachlässigbar klein. Die Zuführung von externem Geschiebe, z.B. im Rahmen von Renaturierungsmaßnahmen, kann allerdings zu einem Geschiebetransport führen, der nicht mehr vernachlässigt werden kann. Das Ausbreitungsverhalten dieser in der Regel begrenzten Geschiebemengen auf statischen Deckschichten fand in bisherigen Untersuchungen nahezu keine Beachtung. Berechnungsansätze zur Beschreibung dieses hochgradig instationären Prozesses existieren nicht.

Mit dem Ziel der Formulierung einer empirischen Gleichung zur Beschreibung des Ausbreitungsvorgangs wurden am Leichtweiß-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig experimentelle Untersuchungen zu dem Transportverhalten einer limitierten Menge externen Geschiebes über statischen Deckschichten durchgeführt. Ein Nebenaspekt dieser Untersuchungen war der Einfluss des Transportvorgangs auf die Stabilität von Deckschichten. Das in Kap. 2 zusammengefasste Wissen über den Widerstand eines Korns gegen den strömungsinduzierten Abtransport und über die Stabilität von Deckschichten stellt eine wesentliche Grundlage für die Untersuchung des Transportverhaltens dar. In Kap. 3 wird der Kenntnisstand aus der Literatur über die Ausbreitung von Geschiebe über statischen Deckschichten erläutert. Aufbauend auf dem Stand des Wissens wird das Ziel der Untersuchungen abgeleitet, die Ausbreitung des externen Materials durch Formeln zu erfassen, mit denen die mittlere Transportgeschwindigkeit und der Grad der Zunahme der Ausbreitung beschrieben werden können. Als maßgebliche Einflussfaktoren wurden die Zugabemenge, die Korngröße des Zugabematerials, der Strömungsangriff, die Oberflächenstruktur der Deckschicht und die Beobachtungszeit identifiziert und mit Hilfe einer Dimensionsanalyse ein allgemeiner funktionaler Zusammenhang der Transportgeschwindigkeit mit diesen Parametern formuliert. In den Experimenten wurde der Einfluss der identifizierten Parameter untersucht.

Für die Versuche wurden insgesamt drei verschiedene statische Deckschichten in zwei Versuchsrinnen hergestellt. Als externes Geschiebe wurde farblich gekennzeichnete Kies (Tracer) verwendet, der in einzelnen Fraktionen als Tracerbarre auf die Sohle aufgebracht wurde. Die gewählten Tracerfraktionen wiesen Korngrößen von 1-3 mm bis 11-16 mm auf. In einem zusätzlichen Versuch wurde eine Kiesmischung mit einem Körnungsbereich von 3-11 mm als Geschiebetracer verwendet. Während der Versuche wurden die zeitliche Entwicklung der Verteilung des externen Geschiebes auf der Deckschicht und der Austrag an erodiertem

Deckschichtmaterial ermittelt. Hieraus wurden Erkenntnisse bezüglich der Transportweiten und -geschwindigkeiten unterschiedlicher Tracerfraktionen sowie über den Einfluss des Transports auf die Stabilität der Deckschichten gewonnen.

Es zeigte sich, dass sich die Transportweite mit zunehmender Versuchsdauer asymptotisch an einen Grenzwert nähert und der Transport des externen Materials praktisch zum Erliegen kommt. Dementsprechend nimmt die Transportgeschwindigkeit der Tracer mit der Versuchszeit ab. Der Vergleich des Transportverhaltens der unterschiedlichen Tracerfraktionen ergab, dass die Transportweite und die -geschwindigkeit unter gleichen hydraulischen Randbedingungen mit abnehmender Tracergröße zunehmen. Weiterhin nimmt die Transportgeschwindigkeit der Tracer mit zunehmendem Strömungsangriff zu. Der Einfluss der Oberflächenstruktur der Deckschicht auf das Transportverhalten der Tracer wurde anhand von Versuchen mit unterschiedlichen Deckschichten untersucht. Es zeigte sich, dass die Transportweiten mit gröber werdender Deckschicht abnehmen. Der Einfluss der Geschiebemenge auf das Transportverhalten wurde anhand von Versuchen mit Zugabemengen zwischen 1,1 kg und 4,4 kg untersucht. Die Transportweite und Geschwindigkeit nehmen mit zunehmender Zugabemenge ebenfalls zu.

Die in dem Versuch zur Ausbreitung eines Korngemischs festgestellte Transportgeschwindigkeit des gesamten Gemischs entsprach der Transportgeschwindigkeit eines Einkornmaterials mit gleichem mittlerem Korndurchmesser. Die differenzierte Betrachtung der einzelnen Kornfraktionen der Mischung ergab jedoch, entgegen der Ergebnisse für den fraktionsweisen Transport, eine mit dem Korndurchmesser zunehmende Transportweite. Das Transportverhalten der einzelnen Kornanteile einer Mischung kann also nicht mit dem Transportverhalten von einzeln transportierten Geschiebefraktionen erklärt werden.

Die Ausbreitung bzw. Verteilung der Tracer wurde anhand der Transportweite der Tracerfront und der mittleren Transportweite der Tracer untersucht. Es wurde festgestellt, dass das Verhältnis dieser Transportweiten umgekehrt proportional zum Strömungsangriff und mit größer werdendem Korndurchmesser zunimmt.

Hinsichtlich des Einflusses des Geschiebetransports auf die Stabilität der Deckschicht ergaben die Versuche, dass selbst bei einer sehr stabilen statischen Deckschicht Sohlenmaterial durch den Transport von externem Geschiebe mobilisiert werden kann, auch wenn die aus der Strömung resultierende Sohlenschubspannung deutlich unterhalb der kritischen Schubspannung der Deckschicht liegt. Die Menge an erodiertem Sohlenmaterial nahm dabei mit kleiner werdendem Korndurchmesser des transportierten Tracers zu. Die Erkenntnisse aus der Literatur

wurden damit bestätigt. Insgesamt war der Austrag jedoch sehr gering und es konnte auch während des Transports des externen Materials davon ausgegangen werden, dass der Anteil des Deckschichtmaterials am Gesamttransport vernachlässigbar ist.

Auf Grundlage der in der Dimensionsanalyse erarbeiteten allgemeinen Formulierung des funktionalen Zusammenhangs und der Versuchsergebnisse wurde eine empirische Formel entwickelt, mit der die mittlere Transportgeschwindigkeit von externem Geschiebe in Abhängigkeit von der Zugabemenge, der Korngröße des Zugabematerials, des Strömungsangriffs, und der charakteristischen Korngröße $d_{50,s}$ der Deckschicht berechnet werden kann. Weiterhin wurde ein funktionaler Zusammenhang zwischen der dimensionslosen Schubspannung und dem Verhältnis der Transportweiten der Tracerfront und der mittleren Transportweite des Tracers formuliert.

Die Überprüfung der Formel für die mittlere Transportgeschwindigkeit mit einem unabhängigen Datensatz und mit Daten aus der Literatur zeigte eine gute Übereinstimmung für 17 der insgesamt 20 Versuche. In den verbleibenden drei Versuchen wurde eine stärkere Abnahme der Transportgeschwindigkeit beobachtet, die durch die entwickelte Gleichung nicht abgebildet wird. Die Ursache hierfür liegt in einer noch nicht hinreichenden Berücksichtigung des Einflusses der Oberflächenstruktur der Deckschichten auf den Transportprozess. Dieser Einfluss äußert sich in Form eines höheren Transportwiderstandes der einzelnen Tracerkörner mit zunehmender Ausbreitung auf der Sohle und steht im Zusammenhang mit der Einbettung der Tracerkörner in der Deckschicht. Zur Ableitung einer Beziehung zur Berechnung des damit veränderten Bewegungsbeginns sind weiterführende Untersuchungen erforderlich.

Insgesamt gesehen ist mit den in dieser Arbeit formulierten empirischen Beziehungen erstmalig die rechnerische Abschätzung der strömungsinduzierten Ausbreitung einer limitierten Geschiebemenge auf statischen Deckschichten möglich. Es besteht jedoch für die Zukunft ein weiterer Bedarf an der Verbesserung dieser Gleichungen.

Die systematische Untersuchung des Bewegungsbeginns von externem Material auf statischen Deckschichten stellt eine sinnvolle Erweiterung des durch diese Arbeit gewonnenen Wissens dar. In die Untersuchung sind dabei die Korngröße des Zugabematerials, die Konzentration des Materials auf der Sohlenoberfläche und die Oberflächenstruktur der Deckschicht einzubeziehen. Mit der resultierenden Beziehung zur Berücksichtigung der mit zunehmender Ausbreitung abnehmenden Exponiertheit der Tracer kann die Abnahme der Mobilität des Zugabematerials während des Transportvorgangs erfasst werden. Hiermit sollte es möglich sein, die in dieser Arbeit gefundene Beziehung allgemeingültig umzuformulieren, so dass auch die

bisher nicht durch die Formel repräsentierten Versuche abgebildet werden können. In den Versuchen sollte ebenfalls das Transportverhalten von Korngemischen und die Wechselwirkung zwischen den einzelnen Kornfraktionen der Mischung näher untersucht werden.

Weiterhin wurde für den Einfluss der Zugabemenge mit dem Variationsbereich der vorliegenden Experimente ein linearer Zusammenhang gefunden. Damit würde jedoch theoretisch eine unbegrenzte Steigerung der Zugabemenge zu einer unendlich hohen Transportgeschwindigkeit führen. Da dies physikalisch nicht möglich ist, ist davon auszugehen, dass sich die Transportgeschwindigkeit mit zunehmender Menge einer maximalen Geschwindigkeit annähert. In einer weiterführenden Arbeit muss deshalb der Einfluss der Tracermenge auf das Transportverhalten von externem Geschiebe weiter untersucht werden. Insbesondere ist dabei der Übergangsbereich zu der maximal erreichbaren Transportgeschwindigkeit interessant, die vermutlich der Transportgeschwindigkeit einer Sohle im Gleichgewichtstransport entspricht.

9 Literatur

Aberle, J. (2000): Untersuchung der Rauheitsstruktur zur Bestimmung des Fließwiderstandes in Gebirgsbächen unter Klarwasserabfluß. Mitt. des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe (TH), Heft 207, Diss.

Aberle J., Dittrich A., Nestmann F. (1999): Description of steep stream roughness with the standard deviation s . Proceedings of the 28th Congress of the IAHR, Graz, 1999.

Aberle, J., Mertens W. (2006): Anwendung und Bedeutung der Dimensionsanalyse im experimentellen Wasserbau, Mitt. Des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau, TU Braunschweig, Heft 155, 157-221.

Aberle, J., Nikora, V. (2006): Statistical properties of armored gravel bed surfaces. Water Resour. Res. 42, W11414, doi:10.1029/2005WR004674.

Allen, J.R.L. (1982): Sedimentary Structures. Dev. Sedimentol., vol. 30A-30B, Elsevier, New York.

Bartley, R., Rutherford, I. (2005): Re-evaluation of the wave model as a tool for quantifying the geomorphic recovery potential of streams disturbed by sediment slugs. Geomorphology, 64, 221–242, doi:10.1016/j.geomorph.2004.07.005.

Best, J.L. (1993): On the interactions between turbulent flow structure, sediment transport and bedform development: Some considerations from recent experimental research. Turbulence: Perspectives on flow and sediment transport. Eds. N.J. Clifford, J.R. French, J. Hardisty, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, U.K., 65-92.

Bezzola, G.R. (2002): Fliesswiderstand und Sohlenstabilität natürlicher Gerinne unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses der relativen Überdeckung. Diss. ETH Zürich, Nr. 14433. <http://dx.doi.org/10.3929/ethz-a-004288999>.

Buckingham, E. (1914): On physically similar systems; illustrations of the use of dimensional equations, Phys. Rew. 4, 345-376.

Buffington, J.M., Montgomery, D.R. (1997): A systematic analysis of eight decades of incipient motion studies, with special reference to gravel-bedded rivers. Wat. Resour. Res., Vol. 33, No. 8, 1993-2029.

- Bui, M.D., Rutschmann, P. (2006): A 3D numerical model of graded sediment transport in nonequilibrium condition. Proc. 7th Int. Conf. on Hydrosience and Engineering (ICHE-2006), 10-13 September, Philadelphia, USA.
- Bui, M.D., Rutschmann, P. (2009): 3D Geschiebetransportmodell - Was ist möglich?. BfG-Veranstaltungen 3/2009, Koblenz, 61-77.
- Buscombe, D., D. C. Conley (2012): Effective shear stress of graded sediments, Water Resour. Res., 48, W05506, doi:10.1029/2010WR010341.
- Chin, C.O. (1985): Stream bed armouring. School of Engineering, Report No. 403, University of Auckland, New Zealand.
- Cui, Y., Parker G., Lisle, T. E., Gott, J., Hansler-Ball, M.E., Pizzuto, J.E., Allmendinger, N.E., Reed, J. M. (2003a): Sediment pulses in mountain rivers: 1. Experiments. Water Resour. Res., 39(9), 1239, doi:10.1029/2002WR001803.
- Cui, Y., Parker, G., Pizzuto, J.E., Lisle, T.E. (2003b): Sediment pulses in mountain rivers: 2. Comparison between experiments and numerical predictions. Water Resour. Res., 39(9), 1240, doi:10.1029/2002WR001805.
- Dancey, C.L., Diplas, P., Papanicolaou, A., Bala, M. (2002): Probability of individual grain movement and threshold condition. J. Hydr. Eng., Vol. 128, No.12, 1069-1075, doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:12(1069).
- Dittrich, A. (1992): An improved model to determine river bed instability. 5th Int. Symp. On River Sedimentation, Karlsruhe, 493-502.
- Dittrich A., Rosport M. & Badde O. (1992): Untersuchungen zum Stabilitätsverhalten von Gerinnesohlen. Mitt. des Instituts für Wasserbau und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe (TH), Germany, Heft 182.
- Dittrich, A. (1998): Wechselwirkung Morphologie/Strömung naturnaher Fließgewässer. Habil., Mitt. des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe (TH), Heft 198.
- Dittrich, A. (2010): Hydraulisch/morphologische Charakterisierung des Rheins zwischen Märkt und Breisach für den Ist- und Planungszustand. Leichtweiß-Institut für Wasserbau TU Braunschweig, LWI-Bericht Nr. 989.

- Dittrich, A., Koll, Kl., Koll, Ka., Huppmann, O. (2011): Der Oberrhein zwischen Weil und Breisach - Transport von Geschiebe über Deckschichten. Proc. 41 Int. Wasserbau-Symp. IWASA, 10-12. Januar, Aachen.
- Duan, J.G., Scott, S. (2007): Selective bed load transport in Las Vegas Wash, a gravel-bed stream. J. Hydrol. 342(3-4), 320-330.
- Egiazaroff, I.V. (1965): Calculation of nonuniform sediment concentrations. J. Hydr. Div., Vol. 91, No. HY4, 225-247.
- Einstein, H.A. (1936): Der Geschiebetrieb als Wahrscheinlichkeitsproblem, Diss. VAW, ETH Zürich.
- Einstein, H.A. (1942): Formulas for the transportation of bed load. Transactions of the American Society of Civil Engineers, Vol. 107, 561-597.
- Einstein, H.A. (1950): The bed load function for sediment transport in open channel flows. Tech. Bull. 1026, U.S. Dep. of Agric., Soil Conserv. Serv., Washington.
- Faulhaber, P., Riehl, K. (2001): Geschiebezugabe an der Elbe. BfG-Veranstaltungen 3/2001 Feststoffeintrag, Laufentwicklung und Transportprozesse in schiffbaren Flüssen, Koblenz, Germany, 67-80.
- Fehr, R. (1987): Einfache Bestimmung der Korngrößenverteilung von Geschiebematerial mit Hilfe der Linienzahlanalyse. Schweizer Ingenieur und Architekt 105, 1104-1109.
- Fenton, J.D., Abbott, J.E. (1977): Initial movement of grains on a stream bed: the effect of relative protrusion. Proc. R. Soc. Lond. A., 523-537.
- Ferguson, R.I., Bloomer, D.J., Hoey, T.B., Werritty, A. (2002): Mobility of river tracer pebbles over different timescales. Water Resour. Res. 38(5), 1045-1052, doi: 10.1029/2001WR000254.
- Ferguson, R.I., Hoey, T.B. (2002): Long-term slowdown of river tracer pebbles: generic models and implications for interpreting short-term tracer studies. Water Resour. Res., Vol. 38, No. 8, 1142, doi: 10.1029/2001WR000637.
- Ferguson, R.I., Wathen, S.J. (1998): Tracer-pebble movement along a concave river profile: Virtual velocity in relation to grain size and shear stress. Water Resour. Res., 34, 2031-2038.
- Garbrecht, G. (1961): Abflussberechnung für Flüsse und Kanäle. Die Wasserwirtschaft, 51. Jahrgang, 40-45.

- Gaeuman, D., Andrews, E.D., Krause, A., Smith, W. (2009): Predicting fractional bed load transport rates: Application of the Wilcock-Crowe equations to a regulated gravel bed river. *Water Resour. Res.*, 45, W06409, doi:10.1029/2008WR007320.
- Ganti, V., Meerschaert, M.M., Foufoula-Georgiou, E., Viparelli, E., Parker, G. (2010): Normal and anomalous diffusion of gravel tracer particles in rivers. *J. Geophys. Res.*, 115, F00A12, doi:10.1029/2008JF001222.
- Gessler, J. (1965): Der Geschiebetriebbeginn bei Mischungen untersucht an natürlichen Abpflasterungserscheinungen in Kanälen. Diss. Nr. 3711, ETH-Zürich.
- Gölz, E. (1999): Dynamic bed stabilization of navigable rivers. *Proc. IAHR Symposium on River, coastal and estuarine morphodynamics*, Genua, Vol.2, 101-110.
- Gölz, E., Trompeter, U. (2001): Transport und Verteilung von Zugabematerial. - Erste Ergebnisse aus den Tracer-versuchen Iffezheim. *BfG-Veranstaltungen 3/2001 Feststoffeintrag, Laufentwicklung und Transportprozesse in schiffbaren Flüssen*, Koblenz, 55-65.
- Griffiths, G. A. (1989): Form resistance in gravel channels with mobile beds. *J. Hydr. Eng.*, Vol. 115, No. 3, 340-355.
- Günter, A. (1971): Die kritische mittlere Sohlenschubspannung bei Geschiebemischungen unter berücksichtigung der Deckschichtbildung und der turbulenzbedingten Sohlenschubspannungsschwankungen. Diss. Nr. 4649, ETH Zürich.
- Habersack, H.M. (2001): Radio-tracking gravel particles in a large braided river in New Zealand: A field test of the stochastic theory of bed load transport proposed by Einstein. *Hydrol. Processes*, 15(3), 377-391.
- Haschenburger, J.K., Wilcock, P.R. (2003): Partial transport in a natural gravel bed channel, *Water Resour. Res.*, 39(1), 1020, doi:10.1029/2002WR001532.
- Hassan, M.A., Church, M. (2000): Experiments on surface structure and partial sediment transport on a gravel bed. *Water Resour. Res.*, 36(7), 1885-1895.
- Hengl, M., Huber, B., Krouzecky, N. (2009): The Integrated River Engineering Project on the Danube to the East of Vienna, River Bed Stabilisation by Coarsening of Bed Material - Section Model Tests. *Proc. 33rd IAHR Congress*, Ed: B. Huber, IAHR, 2009, ISBN: 978-90-78046-08-0, 3888-3895.

- Huang, H.Q. (2010): Reformulation of the bed load equation of Meyer-Peter and Müller in light of the linearity theory for alluvial channel flow. *Water Resour. Res.*, 46, W09533, doi:10.1029/2009WR008974.
- Humphries, R., Venditti, J.G., Sklar, L. S, Wooster, J. K. (2012): Experimental evidence for the effect of hydrographs on sediment pulse dynamics in gravel-bedded rivers, *Water Resour. Res.*, 48, W01533, doi:10.1029/2011WR010419.
- Hunziker, R.P. (1995): Fraktionsweiser Geschiebetransport. Mitt. der VAW, ETH Zürich, Heft138.
- Hunziker, R.P., Jaeggi, M.N.R., (2002): Grain sorting processes. *J. Hydr. Eng.*, Vol. 128, No. 12, 1060-1068.
- Jackson, W.L., Beschta, R.L. (1984): Influences of increased sand delivery on the morphology of sand and gravel channels. *Water Resources Bulletin*, 20(4), 527-533.
- Jain, S.C. (1990): Armor or pavement. *J. Hydr. Eng.*, Vol. 116, No. 3, 436-440.
- Jüpner, R. (1993): Die Erosion grober Sohlpartikel: Untersuchung der Auftriebs- und Schubkräfte. Dissertation im Fachbereich Geowissenschaften, FU Berlin.
- Koll, Ka. (2002): Feststofftransport und Geschwindigkeitsverteilung in Raugerinnen. [online], Karlsruhe, Univ., Fak. f. Bauingenieur- und Vermessungswesen, Diss. v. 12.07.2002, <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/cgi-bin/ps/view?document=2002/bau-verm/12>.
- Koll, Ka. (2004): Transport Processes over Static Armour Layers. *Proc. 5th Int. Symp. on Ecohydraulics "Aquatic Habitats: Analysis & Restoration"*, 12-17 September 2004, Madrid, Spain, Eds. D. García de Jalón Lastra & P.V. Martínez, 442-448.
- Koll, Kl., Koll, Ka. (2012): Influence of depot size on bed load transport velocity over static armour layers. *Proc. Int. Conf. on Fluvial Hydraulics River Flow 2012*, San José, Costa Rica, Ed. R. Murillo Muñoz, 451-456.
- Koll, Kl., Koll, Ka., Dittrich, A. (2010): Sediment transport over static armour layers and its impact on bed stability. *Proc. Int. Conf. on Fluvial Hydraulics River Flow 2010*, Braunschweig, Germany, Eds. A. Dittrich, Ka. Koll, J. Aberle & P. Geisenhainer, 929-936.
- Komar, P. D., Li, Z. (1986): Pivoting analysis of the selective entrainment of sediments by shape and size with applications to gravel threshold. *Sedimentology*, 33, 425-436.
- Lee, H., Balachandar, S. (2012): Critical shear stress for incipient motion of a particle on a rough bed. *J. Geophys. Res.*, Vol. 117, F01026, doi:10.1029/2011JF002208.

- Lisle, T.E., Cui, Y., Parker, G., Pizzuto, J.E., Dodd, A.M. (2001): The dominance of dispersion in the evolution of bed material waves in gravel-bed rivers. *Earth Surf. Process. Landforms* 26, 1409–1420, doi: 10.1002/esp.300.
- Lisle, T.E., Pizzuto, J.E., Ikeda, H., Iseya, F., Kodama, Y. (1997): Evolution of a sediment wave in an experimental channel. *Water Resour. Res.*, Vol. 33, No. 8, 1971-1981, doi: 97WR01180.0043-1397/97/97WR-01180\$09.00.
- Little, W.C., Mayer, P.G. (1976): Stability of channel beds by armouring. *J. Hydr. Div.*, Vol. 102, No. HY11, 1647-1661.
- Madej, M.A. (2001): Development of channel organization and roughness following sediment pulses in single-thread, gravel bed rivers, *Water Resour. Res.*, 37(8), 2259-2272, doi:10.1029/2001WR000229.
- Mao L., Cavalli M., Comiti F., Marchi L., Lenzi M.A., Arattano M. (2009): Sediment transfer processes in two Alpine catchments of contrasting morphological settings. *Journal of Hydrology*, 364(1-2), 88-98.
- Mao L., Cooper J., Frostick L. (2011): Grain size and topographical differences between static and mobile armour layers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36(10), 1321–1334.
- Measures, R., Tait, S. (2008): Quantifying the role of bed surface topography in controlling sediment stability in waterworked gravel deposits. *Water Resour. Res.*, 44, W04413, doi:10.1029/2006WR005794.
- Mertens, W. (1997): Grundlagen hydraulisch-sedimentologischer Berechnungen, DVWK, Schriften 118, Verlag Paul Parey, Hamburg, 19-42.
- Merz, J.E., Ochikubo Chan, L.K. (2005): Effects of gravel augmentation on macroinvertebrate assemblages in a regulated California river, *River Res. Appl.*, 21, 61–74, doi:10.1002/rra.819.
- Meyer-Peter, E., Müller, R. (1949): Eine Formel zur Berechnung des Geschiebetriebes. *Schweiz. Bauzeitung*, Jhg. 67, Heft 3, 29-32.
- Misri, R.L., Garde, R.J., Ranga Raju, K.G. (1984): Bed load transport of coarse nonuniform sediment. *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 110, No. 3, 312-328.

- Miyazaki, T., Kurebayasi, M., Yamada T., Marutani, T. (2006): Translation and Dispersion of Sediment Pulses Induced by an Extreme Rainfall in Mountain Rivers, Proc. INTERPRAEVENT, Int. Symp. on Disaster Mitigation of Debris Flows, Slope Failures and Landslides, 25-27 September, Niigata, Japan, Eds. H. Marui et al., Vol. 1, 331-341.
- Müller, E.R., Pitlick, J., Nelson, J.M. (2005): Variation in the reference Shields stress for bed load transport in gravelbed streams and rivers. *Water Resour. Res.*, 41, W04006, doi:10.1029/2004WR003692.
- Nelson, J.M., Schmeeckle, M.W., Shreve, R.L. (2001): Turbulence and particle entrainment. *Gravel Bed Rivers V*, Ed. M.P. Mosley, 221-248.
- Nikora, V., Goring, D., Biggs, B.J.F. (1998): On gravel-bed roughness characterization. *Water Resour. Res.*, Vol. 34, No. 3, 517– 527.
- Nikora, V., Habersack, H., Huber, T., McEwan, I. (2002): On bed particle diffusion in gravel bed flows under weak bed load transport. *Water Resour. Res.*, 38, 1081, doi: 10.1029/2001WR000513.
- Paintal, A.S. (1971): A stochastic model of bed load transport. *J. Hydraul. Res.*, 9(4), 527-554.
- Parker, G. (1990): Surface-based bedload transport relation for gravel rivers. *J. Hydr. Res.*, Vol. 28, No. 4, 417-436.
- Parker, G., Dhamotharan, S., Stefan, H. (1982): Model experiments on mobile, paved gravel bed streams. *Water Resour. Res.*, Vol. 18, No. 5, 1395-1408.
- Parker, G., Klingeman, P.C. (1982): On why gravel bed streams are paved. *Water. Resour. Res.*, Vol. 18, No.5, 1409-1423.
- Parker, G., Paola, C., Leclair, S. (2000): Probabilistic Exner sediment continuity equation for mixtures with no active layer. *J. Hydrual. Eng.*, 126(11), 818–826.
- Pasternack, G.B., Wang, C.L., Merz, J.E. (2004): Application of a 2D hydrodynamic model to design of reach-scale spawning gravel replenishment on the Mokelumne River, California. *River Res. Appl.*, 20, 205-225, doi:10.1002/rra.748.
- Patel, P., Porey, P., Ghare, A., Patel, S.B. (2009): Entrainment characteristics of nonuniform unimodal and bimodal sediments. *KSCE Journal of Civ. Eng.*, vol. 13, No. 3, 189-194, doi: 10.1007/s12205-009-0189-2.

- Patnaik, P.C., Vittal, N., Pande, P.K. (1994): Lift coefficient of a stationary sphere in gradient flow. *J. Hydr. Res.*, Vol. 32, No. 3, 471-480.
- Phillips, B.C., Sutherland, A.J. (1989): Spatial lag effects in bed load sediment transport. *J. Hydr. Res.*, Vol. 27, No. 1, 115-133.
- Pitlick, J., Mueller, E. R., Segura, C., Cress, R., Torizzo, M. (2008): Relation between flow, surface-layer armoring and sediment transport in gravel-bed rivers. *Earth Surf. Process. Landforms* 33, 1192–1209, doi: 10.1002/esp.1607.
- Pitlick, J.C. (1993): Response and recovery of a subalpine stream following a catastrophic flood. *Geological Society of America Bulletin*. Vol. 105, 657-670.
- Promny, M. (2008a): Advektion und Dispersion von Geschiebe. Diss, Institut für Wasserwesen, Bundeswehr University, Munich, Germany.
- Promny, M. (2008b): Propagation velocity of bed load material in dunes. *Proc. Int. Conf. on Fluvial Hydraulics River Flow 2008*, 3-5 September 2008, Cesme, Turkey. Eds. M. Altinakar, M.A. Kokpinar, I. Aydin, S. Cokgor, and S. Kirkgoz, Kubaba, Izmir, Turkey, Vol. 2, 921-928.
- Pyrce, R. S., Ashmore, P. E. (2003): Particle path length distributions in meandering gravel-bed streams: results from physical models. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 28, 951–966.
- Rickenmann, D. (1990): Bedload transport capacity of slurry flows at steep slopes. *Mitt. der VAW, ETH Zürich*, Heft 103.
- Schlichting, H., Gersten, K. (1997): *Grenzschicht-Theorie*, 9. Auflage, Springer, New York.
- Schmeeckle, M.W., Nelson, J.M., Shreve, R.L. (2007): Forces on stationary particles in near-bed turbulent flows. *J. Geophys. Res.*, 112, F02003.
- Schmidt, K.-H., Ergenzinger, P. (1992): Bedload entrainment, travel lengths, step lengths, rest periods-studied with passive (iron, magnetic) and active (radio) tracer techniques. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 17, 147-165.
- Schöberl, F. (1979): Zur Frage der Gefälllsausbildung beim Selbststabilisierungsprozess von erodierenden Flußstrecken. Diss. Institut für Konstruktiven Wasser- und Tunnelbau, Universität Innsbruck.
- Schöberl, F. (1981): Abpflasterungs- und Selbststabilisierungsvermögen erodierter Gerinne. *Österreichische Wasserwirtschaft*, Jg. 33, Heft 7/8, S. 180-186.

- Schöberl, F. (1992a): Prediction methods for grain size distribution and armour layer stability. Proc. Int. Grain Sorting Seminar, Ascona, Switzerland, Oct 1991, Mitt. der VAW, ETH Zürich, Heft 117, 251-271.
- Schöberl, F. (1992b): Upper limits and transition stages of developing armour coats. Proc. 5th Int. Symp. on River Sedimentation, Karlsruhe, Germany, 671-676.
- Shields, A. (1936): Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. Mitt. der Preußischen Versuchsanstalt für Wasser- und Schiffbau, Berlin, Heft 26.
- Shvidchenko, A.B., Pender, G., Hoey, T.B. (2001): Critical shear stress for incipient motion of sand/gravel streambeds. Water. Resour. Res., Vol. 37, No. 8, 2273-2283.
- Sklar, L.S., Fadde, J., Venditti, J.G., Nelson, P., Wydzga, M.A., Cui, Y., Dietrich, W.E. (2009): Translation and dispersion of sediment pulses in flume experiments simulating gravel augmentation below dams. Water Resour. Res., 45, W08439, doi:10.1029/2008WR007346.
- Smart, G.M., Jäggi, M.N.R. (1983): Sedimenttransport in steilen Gerinnen. Mitt. der VAW, ETH Zürich, Heft 64.
- Sun, Z., Donahue, J. (2000): Statistically derived bedload formula for any fraction of nonuniform sediment. J. Hydr. Eng., Vol. 126, No. 2, 105-111.
- Suszka, L. (1991): Modification of transport rate formula for steep channels. Lecture Notes in Earth Sciences - Fluvial Hydraulics of Mountain Regions, Vol. 37, Eds. A. Armanini & G. Di Silvio, Springer Verlag, 59-70.
- Sutherland, D.G., Hansler-Ball, M., Hilton, S.J., Lisle, T.E. (2002): Evolution of a landslide-induced sediment wave in the Navarro River, California, Geol. Soc. Am. Bull., 114, 1036-1048, doi:10.1130/0016-7606(2002)114<1036:EOALIS>2.0.CO;2.
- Trush, W.J., McBain, S.M., Leopold, L.B. (2006): Attributs of an alluvial river and their relation to water policy and management. Proc. National Academy of Sciences of the United States of America, Vol. 97, No. 22, 11858-11863.
- Tsujimoto, T. (1978): Probabilistic model of the process of bed load transport and its application to mobile-bed problems. Ph.D. thesis, Kyoto Univ., Kyoto, Japan.
- Turowski, J.M. (2010): Probability distributions of bed load transport rates: A new derivation and comparison with field data. Water Resour. Res., 46, W08501, doi:10.1029/2009WR008488.

- Venditti, J.G., Dietrich, W.E., Nelson, P.A., Wydzga, M.A., Fadde, J., Sklar, L. (2010a): Mobilization of coarse surface layers in gravel-bedded rivers by finer gravel bed load. *Water Resour. Res.*, 46, W07506, doi:10.1029/2009WR008329.
- Venditti, J.G., Dietrich, W.E., Nelson, P.A., Wydzga, M.A., Fadde, J., Sklar, L. (2010b): Effect of sediment pulse grain size on sediment transport rates and bed mobility in gravel bed rivers. *J. Geophys. Res.*, 115, F03039, doi:10.1029/2009JF001418.
- Vollmer, S., Kleinhans, M.G. (2007): Predicting incipient motion, including the effect of turbulent pressure fluctuations in the bed. *Water Resour. Res.*, 43, W05410, doi:10.1029/2006WR004919.
- Wang, X., Zheng, J., Li, D., Qu, Z. (2008): Modifikation of the Einstein bed-load formula. *J. Hydr. Eng.*, Vol. 134, No. 9, 1363-1369, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:9(1363).
- Wilcock, P.R. (1997): The components of fractional transport rate. *Water Resour. Res.*, Vol. 33, No. 1, 247-258.
- Wilcock, P.R. (2001): The flow, the bed, and the transport: Interaction in flume and field. *Gravel-Bed Rivers V*, Ed. M.P. Mosley, 183-208.
- Wilcock, P.R., Barta, A.F., Shea, C.C., Kondolf, G.M., Matthews, W.V.G., Pitlick, J. (1996a): Observations of flow and sediment entrainment on a large gravel-bed river. *Water. Resour. Res.*, Vol. 32, No. 9, 2897-2909.
- Wilcock, P.R., Crowe, J.C. (2003): A surface-based transport model for sand and gravel. *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 129, No. 2, 120– 128, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:2(120).
- Wilcock, P.R., DeTemple, B.T. (2005): Persistence of armor layers in gravel-bed streams. *Geophys. Res. Letters*, Vol. 32, L08402, doi:10.1029/2004GL021772.
- Wilcock, P.R., Kondolf, G.M., Matthews, W.V.G., Barta, A.F. (1996b): Specification of sediment maintenance flows for a large gravel-bed river. *Water. Resour. Res.*, Vol. 32, No. 9, 2911-2921.
- Wilcock, P.R., McArdell, B.W. (1993): Surface-based fractional transport rates: Mobilization thresholds and partial transport of a sand-gravel sediment. *Water. Resour. Res.*, Vol. 29, No. 4, 1297-1312.
- Wilcock, P.R., Southard, J.B. (1988): Experimental study on incipient motion in mixed-size sediment. *Water. Resour. Res.*, Vol. 24, No. 7, 1137-1151.

- Wohl, E. Rathburn, S. (2003): Mitigation of sedimentation Hazards downstream from reservoirs. *International Journal of Sediment Research*, Vol. 18, No. 2, 2003, 97-106.
- Wong M., Parker G., DeVries P., Brown T.M., Burges S.J. (2007): Experiments on dispersion of tracer stones under lower-regime plane-bed equilibrium bed load transport. *Water Resour. Res.* 43, W03440, doi:10.1029/2006WR005172.
- Wong, M., Parker, G. (2006): Reanalysis and correction of bed-load relation of Meyer-Peter and Müller using their own database. *J. Hydr. Eng.*, Vol. 132, 1159–1168.
- Wu, F.-C., Chou, Y.-J. (2003): Rolling and lifting probabilities for sediment entrainment. *J. Hydr. Eng.*, Vol. 129, No. 2, 110–119.
- Wu, F.-C., Yang, K.-H. (2004): A stochastic partial transport model for mixed-size sediment: Application to assessment of fractional mobility. *Water Resour. Res.*, 40, W04501, doi:10.1029/2003WR002256.
- Wu, W., Wang, S.S.Y., Jia, Y. (2000): Nonuniform sediment transport in alluvial rivers. *J. Hydr. Res.*, Vol. 38, No. 6, 427-434.
- Yalin, M.S. (1965): *Similarity in Sediment Transport by Currents*. Hydraulic Research Paper, No. 6, Hydraulic Research Station, Wallingford, Berks.
- Yalin, M.S. (1977): *Mechanics of sediment transport*, second edition. Pergamon Verlag, Oxford, New York, Toronto, Sydney, Paris, Frankfurt.

Anhang

Anhang A1: Tracerversuche mit Z_{X1} , $\tau_0 = 9,3 \text{ N/m}^2$

Versuch	Versuchszeit		Tracer				Messergebnisse zur Versuchszeit t							
	t [min]	d _T [mm]	d _{50,T} [mm]	m _T [g]	C _A [m ² /m ²]	ΔL_S [m]	L _S [m]	u _{T,S} [m/h]	$\bar{u}_{T,S}$ [m/h]	ΔL_F [m]	L _F [m]	u _{T,F} [m/h]	$\bar{u}_{T,F}$ [m/h]	L _F /L _S
H01	15	1-3	2,0	5300	1,00	3,53	3,53	14,13	14,13	6,10	6,10	24,40	24,40	1,73
	30				0,27	0,72	4,25	2,87	8,50	1,71	7,82	6,86	15,63	1,84
	60				0,19	0,46	4,71	0,91	4,71	0,66	8,47	1,31	8,47	1,80
	90				0,19	0,22	4,92	0,43	3,28	0,31	8,78	0,63	5,86	1,79
	150				0,13	0,28	5,20	0,28	2,08	0,41	9,19	0,41	3,68	1,77
	210				0,13	0,10	5,30	0,10	1,51	0,26	9,45	0,26	2,70	1,78
H02	15	3-5	4,0	5200	1,00	1,46	1,46	5,83	5,83	2,78	2,78	11,13	11,13	1,91
	30				0,22	0,55	2,00	2,19	4,01	0,99	3,77	3,96	7,55	1,88
	60				0,17	0,64	2,64	1,28	2,64	1,30	5,08	2,61	5,08	1,92
	90				0,13	0,37	3,02	0,74	2,01	1,03	6,11	2,07	4,07	2,03
	150				0,11	0,40	3,41	0,40	1,36	0,68	6,79	0,68	2,72	1,99
	210				0,10	0,29	3,70	0,29	1,06	0,55	7,34	0,55	2,10	1,98
	330				0,09	0,37	4,07	0,18	0,74	0,67	8,01	0,34	1,46	1,97
	450				0,08	0,23	4,30	0,11	0,57	0,73	8,74	0,36	1,17	2,03
H03	690				0,07	0,29	4,59	0,07	0,40	0,56	9,30	0,14	0,81	2,03
	15	5-8	6,5	5300	1,00	0,74	0,74	2,95	2,95	1,85	1,85	7,40	7,40	2,51
	30				0,32	0,24	0,98	0,97	1,96	0,52	2,37	2,10	4,75	2,42
	60				0,26	0,30	1,28	0,59	1,28	0,70	3,08	1,41	3,08	2,41
	90				0,21	0,17	1,44	0,33	0,96	0,40	3,47	0,79	2,32	2,41
	150				0,19	0,23	1,67	0,23	0,67	0,40	3,87	0,40	1,55	2,32
	210				0,17	0,17	1,84	0,17	0,53	0,37	4,24	0,37	1,21	2,31
	330				0,15	0,35	2,19	0,18	0,40	0,57	4,82	0,29	0,88	2,20
	450				0,13	0,27	2,46	0,13	0,33	0,51	5,33	0,26	0,71	2,17
	690				0,11	0,39	2,85	0,10	0,25	1,18	6,51	0,30	0,57	2,29
	930				0,09	0,25	3,10	0,06	0,20	0,54	7,06	0,14	0,46	2,28

Versuch	Versuchszeit		Tracer				Messergebnisse zur Versuchszeit t							
	t [min]	d _T [mm]	d _{50,T} [mm]	m _T [g]	C _A [m ² /m ²]	ΔL _S [m]	L _S [m]	u _{T,s} [m/h]	ū _{T,s} [m/h]	ΔL _F [m]	L _F [m]	u _{T,F} [m/h]	ū _{T,F} [m/h]	L _F /L _S
H04	15	8-11	9,6	4800	1,00	0,28	0,28	1,13	1,13	0,83	0,83	3,31	3,31	2,93
	30				0,39	0,01	0,30	0,05	0,59	0,13	0,96	0,52	1,92	3,25
	60				0,34	0,01	0,31	0,02	0,31	0,01	0,97	0,02	0,97	3,03
	90				0,34	0,00	0,31	0,01	0,20	0,02	0,99	0,05	0,66	3,23
H05	15			5200	1,00	1,70	1,70	6,81	6,81	3,58	3,58	14,33	14,33	2,10
	30				0,19	0,58	2,28	2,31	4,56	1,11	4,70	4,45	9,39	2,06
	60				0,15	0,56	2,84	1,12	2,84	1,26	5,96	2,53	5,96	2,10
	90				0,12	0,39	3,22	0,77	2,15	0,67	6,64	1,35	4,42	2,06
	150				0,10	0,43	3,65	0,43	1,46	0,95	7,58	0,95	3,03	2,08
	210				0,09	0,21	3,86	0,21	1,10	0,37	7,95	0,37	2,27	2,06
	330				0,08	0,36	4,22	0,18	0,77	0,47	8,42	0,24	1,53	1,99
	450				0,07	0,29	4,51	0,14	0,60	0,44	8,86	0,22	1,18	1,97
H06	690				0,06	0,33	4,84	0,08	0,42	0,45	9,32	0,11	0,81	1,93
	15	5-8	6,5	5000	1,00	0,50	0,50	1,99	1,99	1,17	1,17	4,69	4,69	2,35
	30				0,36	0,15	0,65	0,61	1,30	0,33	1,51	1,34	3,01	2,32
	60				0,31	0,21	0,86	0,43	0,86	0,54	2,05	1,09	2,05	2,37
	90				0,24	0,15	1,01	0,29	0,67	0,35	2,40	0,70	1,60	4,03
	150				0,21	0,24	1,25	0,24	0,50	0,63	3,03	0,63	1,21	2,44
	210				0,16	0,25	1,50	0,25	0,43	0,38	3,42	0,38	0,98	2,29
	330				0,15	0,31	1,80	0,15	0,33	0,50	3,92	0,25	0,71	2,18
	450				0,14	0,31	2,12	0,16	0,28	0,69	4,61	0,35	0,62	2,18
	690				0,11	0,34	2,45	0,08	0,21	0,73	5,34	0,18	0,46	2,18
	930				0,10	0,26	2,71	0,06	0,17	0,61	5,95	0,15	0,38	2,20

Anhang A2: Tracerversuche mit Z_{X1} , $\tau_0 = 10,7 \text{ N/m}^2$

Versuch	Versuchszeit		Tracer				Messergebnisse zur Versuchszeit t							
	t [min]	d _T [mm]	d _{50,T} [mm]	m _T [g]	C _A [m ² /m ²]	ΔL _S [m]	L _S [m]	u _{T,S} [m/h]	ū _{T,S} [m/h]	ΔL _F [m]	L _F [m]	u _{T,F} [m/h]	ū _{T,F} [m/h]	L _F /L _S [-]
H07	15	3-5	4,0	5200	1,00	1,67	1,67	6,67	6,67	3,10	3,10	12,39	12,39	1,86
H07	30				0,23	0,96	2,63	3,84	5,25	2,14	5,24	8,57	10,48	2,00
H07	60				0,17	0,87	3,50	1,74	3,50	1,69	6,94	3,39	6,94	1,98
H07	90				0,13	0,38	3,87	0,75	2,58	0,73	7,67	1,46	5,11	1,98
H07	150				0,12	0,47	4,35	0,47	1,74	0,90	8,57	0,90	3,43	1,97
H07	210				0,11	0,35	4,70	0,35	1,34	0,61	9,19	0,61	2,62	1,96
H08	15	5-8	6,5	5000	1,00	0,45	0,45	1,80	1,80	1,14	1,14	4,55	4,55	2,53
H08	30				0,36	0,65	1,10	2,61	2,21	1,56	2,70	6,24	5,40	5,03
H08	60				0,20	0,46	1,56	0,91	1,56	0,95	3,64	1,89	3,64	2,34
H08	90				0,14	0,29	1,84	0,57	1,23	0,78	4,42	1,55	2,95	2,40
H08	150				0,11	0,43	2,28	0,43	0,91	0,79	5,21	0,79	2,08	2,29
H08	210				0,09	0,32	2,60	0,32	0,74	0,64	5,85	0,64	1,67	2,25
H08	330				0,08	0,36	2,96	0,18	0,54	0,70	6,55	0,35	1,19	2,21
H08	450				0,07	0,26	3,22	0,13	0,43	0,43	6,98	0,22	0,93	2,17
H08	690				0,06	0,40	3,63	0,10	0,32	0,74	7,72	0,19	0,67	2,13
H08	930				0,05	0,22	3,85	0,06	0,25	0,65	8,38	0,16	0,54	2,18

Versuch	Versuchszeit		Tracer				Messergebnisse zur Versuchszeit t							
	t [min]	d _r [mm]	d _{50,T} [mm]	m _T [g]	C _A [m ² /m ²]	ΔL _S [m]	L _S [m]	u _{T,S} [m/h]	ū _{T,S} [m/h]	ΔL _F [m]	L _F [m]	u _{T,F} [m/h]	ū _{T,F} [m/h]	L _F /L _S [-]
H09	15	8-11	9,6	4800	1,00	0,23	0,23	0,93	0,93	0,72	0,72	2,87	2,87	3,11
H09	30				0,43	0,11	0,34	0,42	0,67	0,33	1,05	1,32	2,10	3,11
H09	60				0,34	0,08	0,42	0,17	0,42	0,45	1,50	0,90	1,50	3,55
H09	90				0,27	0,09	0,51	0,17	0,34	0,73	2,22	1,45	1,48	6,03
H09	150				0,19	0,08	0,58	0,08	0,23	0,44	2,67	0,44	1,07	4,57
H09	210				0,17	0,05	0,63	0,05	0,18	0,06	2,73	0,06	0,78	4,31
H09	330				0,16	0,06	0,70	0,03	0,13	0,14	2,87	0,07	0,52	4,13
H09	450				0,16	0,07	0,76	0,03	0,10	0,09	2,96	0,05	0,40	3,88
H09	690	11-16	13,5	4800	0,15	0,15	0,91	0,04	0,08	0,29	3,26	0,07	0,28	3,58
H09	930				0,13	0,21	1,12	0,05	0,07	0,44	3,69	0,11	0,24	3,31
H10	15				1,00	0,19	0,19	0,75	0,75	0,56	0,56	2,24	2,24	2,98
H10	30				0,42	0,07	0,26	0,28	0,51	0,49	1,05	1,97	2,10	4,09
H10	60				0,32	0,06	0,32	0,12	0,32	0,90	1,95	1,80	1,95	6,14
H10	90				0,19	0,03	0,35	0,06	0,23	0,10	2,05	0,20	1,37	5,89
H10	150				0,16	0,06	0,41	0,06	0,16	0,24	2,29	0,24	0,91	5,57
H10	210				0,18	0,01	0,42	0,01	0,12	0,34	2,62	0,34	0,75	6,24

Anhang A3: Tracerversuche mit D_{X2} , $\tau_0 = 13,5 \text{ N/m}^2$

Versuch	Versuchszeit	Tracer				Messergebnisse zur Versuchszeit t								
	t [min]	d _T [mm]	d _{50,T} [mm]	m _T [g]	C _A [m²/m²]	ΔL _S [m]	L _S [m]	u _{T,S} [m/h]	ū _{T,S} [m/h]	ΔL _F [m]	L _F [m]	u _{T,F} [m/h]	ū _{T,F} [m/h]	L _F /L _S [-]
H11	15	3-5	4,0	5200	1,00	1,56	1,56	6,23	6,23	2,96	2,96	11,84	11,84	1,90
H11	30				0,22	0,61	2,17	2,46	4,34	1,37	4,33	5,49	8,66	7,03
H11	60				0,14	0,39	2,56	0,78	2,56	0,88	5,21	1,77	5,21	2,03
H11	90				0,13	0,19	2,75	0,37	1,83	0,45	5,67	0,90	3,78	2,06
H11	150				0,10	0,16	2,91	0,16	1,16	0,76	6,42	0,76	2,57	2,21
H11	210				0,08	0,11	3,02	0,11	0,86	0,47	6,89	0,47	1,97	2,28
H11	330				0,07	0,06	3,08	0,03	0,56	0,42	7,31	0,21	1,33	2,38
H11	450				0,07	0,02	3,09	0,01	0,41	0,20	7,51	0,10	1,00	2,43
H11	690	5-8	6,5	5000	0,07	0,04	3,13	0,01	0,27	0,32	7,83	0,08	0,68	2,50
H11	930				0,05	0,03	3,16	0,01	0,20	0,10	7,93	0,03	0,51	2,51
H12	15	5-8	6,5	5000	1,00	0,83	0,83	3,31	3,31	1,75	1,75	7,00	7,00	2,11
H12	30				0,29	0,59	1,41	2,35	2,83	1,28	3,03	5,11	6,05	2,14
H12	60				0,18	0,37	1,78	0,74	1,78	0,72	3,75	1,44	3,75	2,10
H12	90				0,15	0,15	1,94	0,30	1,29	0,35	4,10	0,70	2,73	2,12
H12	150				0,13	0,22	2,15	0,22	0,86	0,53	4,63	0,53	1,85	2,15
H12	210				0,11	0,13	2,29	0,13	0,65	0,42	5,04	0,42	1,44	8,03
H12	330				0,10	0,12	2,40	0,06	0,44	0,42	5,47	0,21	0,99	2,27
H12	450				0,09	0,09	2,50	0,05	0,33	0,29	5,75	0,14	0,77	2,30
H12	690	5-8	6,5	5000	0,08	0,11	2,61	0,03	0,23	0,30	6,05	0,08	0,53	2,32
H12	930				0,07	0,08	2,69	0,02	0,17	0,40	6,45	0,10	0,42	2,40

Versuch	Versuchszeit		Tracer				Messergebnisse zur Versuchszeit t							
	t [min]	d _r [mm]	d _{50,T} [mm]	m _T [g]	C _A [m ² /m ²]	ΔL _S [m]	L _S [m]	u _{T,S} [m/h]	ū _{T,S} [m/h]	ΔL _F [m]	L _F [m]	u _{T,F} [m/h]	ū _{T,F} [m/h]	L _F /L _S [-]
H13	15				1,00	0,35	0,35	1,42	1,42	0,82	0,82	3,27	3,27	2,30
H13	30				0,37	0,18	0,54	0,73	1,07	0,85	1,67	3,41	3,34	3,11
H13	60				0,21	0,12	0,66	0,24	0,66	0,31	1,98	0,62	1,98	3,01
H13	90				0,19	0,08	0,74	0,15	0,49	0,18	2,17	0,37	1,44	2,94
H13	150				0,17	0,10	0,84	0,10	0,33	0,22	2,39	0,22	0,95	2,86
H13	210			4800	0,16	0,07	0,90	0,07	0,26	0,36	2,75	0,36	0,79	3,04
H13	330				0,14	0,12	1,03	0,06	0,19	0,43	3,18	0,22	0,58	3,10
H13	450				0,12	0,07	1,10	0,04	0,15	0,27	3,45	0,13	0,46	3,14
H13	690				0,11	0,11	1,21	0,03	0,11	0,27	3,72	0,07	0,32	3,08
H13	930				0,10	0,07	1,28	0,02	0,08	0,45	4,17	0,11	0,27	9,03
H14	15				1,00	0,84	0,84	3,38	3,38	1,86	1,86	7,42	7,42	2,20
H14	30				0,27	0,44	1,28	1,74	2,56	0,77	2,63	3,08	5,25	2,05
H14	60				0,19	0,21	1,49	0,42	1,49	0,41	3,04	0,82	3,04	2,04
H14	90				0,19	0,15	1,63	0,29	1,09	0,59	3,63	1,18	2,42	2,22
H14	150				0,13	0,16	1,80	0,16	0,72	0,37	3,99	0,37	1,60	2,22
H14	210			5250	0,13	0,13	1,93	0,13	0,55	0,44	4,43	0,44	1,27	2,30
H14	330	3-11	7,1		0,10	0,14	2,07	0,07	0,38	0,27	4,70	0,14	0,85	2,27
H14	450				0,09	0,11	2,17	0,05	0,29	0,81	5,51	0,40	0,73	2,53
H14	690				0,08	0,11	2,29	0,03	0,20	0,56	6,07	0,14	0,53	2,65
H14	930				0,07	0,10	2,39	0,03	0,15	0,62	6,69	0,16	0,43	2,80

Anhang A4: Tracerversuche mit Z_{X3} , $\tau_0 = 6,4 \text{ N/m}^2$

Versuch	Versuchszeit		Tracer				Messergebnisse zur Versuchszeit t							
	t [min]	d _T [mm]	d _{50,T} [mm]	m _T [g]	C _A [m ² /m ²]	ΔL_S [m]	L _S [m]	u _{T,S} [m/h]	$\bar{u}_{T,S}$ [m/h]	ΔL_F [m]	L _F [m]	u _{T,F} [m/h]	$\bar{u}_{T,F}$ [m/h]	L _F /L _S [-]
K01	15	3-5	4,0	1100	1,00	0,33	0,33	1,31	1,31	0,63	0,63	2,54	2,54	1,94
K01	30					0,27	0,60	1,10	1,20	0,54	1,18	2,17	2,35	1,96
K01	60					0,25	0,85	0,50	0,85	0,44	1,62	0,89	1,62	1,90
K01	90					0,15	1,00	0,30	0,67	0,37	1,99	0,74	1,33	10,03
K01	150					0,35	1,35	0,35	0,54	0,60	2,59	0,60	1,04	1,92
K01	210					0,15	1,50	0,15	0,43	0,27	2,87	0,27	0,82	1,91
K01	330					0,22	1,72	0,11	0,31	0,31	3,18	0,16	0,58	1,84
K02	15	3-5	4,0	2000	1,00	0,53	0,53	2,14	2,14	0,96	0,96	3,85	3,85	1,80
K02	30				0,53	0,44	0,97	1,75	1,94	0,88	1,85	3,54	3,69	1,90
K02	60				0,26	0,36	1,33	0,73	1,33	0,80	2,65	1,61	2,65	1,99
K02	90				0,23	0,15	1,49	0,30	0,99	0,29	2,95	0,59	1,96	1,98
K03	15	3-5	4,0	2200	1,00	0,62	0,62	2,49	2,49	1,15	1,15	4,61	4,61	1,85
K03	30				0,44	0,47	1,10	1,89	2,19	0,85	2,01	3,42	4,01	1,83
K03	60				0,30	0,43	1,52	0,85	1,52	0,92	2,92	1,83	2,92	1,92
K03	90				0,20	0,18	1,70	0,35	1,13	0,28	3,20	0,56	2,13	1,88

Versuch	Versuchszeit	Tracer				Messergebnisse zur Versuchszeit t									
	t [min]	d _T [mm]	d _{50,T} [mm]	m _T [g]	C _A [m²/m²]	ΔL _S [m]	L _S [m]	u _{T,s} [m/h]	ū _{T,s} [m/h]	ΔL _F [m]	L _F [m]	u _{T,F} [m/h]	ū _{T,F} [m/h]	L _F /L _S [-]	
K04	15				1,00	0,61	0,61	2,44	2,44	1,15	1,15	4,62	4,62	1,90	
K04	30	3-5	4,0	3300	0,51	0,66	1,27	2,64	2,54	1,35	2,50	5,39	5,00	1,97	
K04	60				0,33	0,49	1,76	0,97	1,76	0,70	3,20	1,40	3,20	11,03	
K05	15				1,00	0,75	0,75	3,00	3,00	1,31	1,31	5,23	5,23	1,75	
K05	30	3-5	4,0	4400	0,57	0,90	1,65	3,61	3,30	1,80	3,11	7,19	6,21	1,88	
K06	15				1,00	0,33	0,33	1,33	1,33	0,78	0,78	3,12	3,12	2,35	
K06	30				0,32	0,16	0,50	0,65	0,99	0,49	1,27	1,96	2,54	2,56	
K06	60				0,20	0,15	0,65	0,31	0,65	0,36	1,63	0,71	1,63	2,50	
K06	90	3-5	4,0	1100	0,18	0,04	0,69	0,08	0,46	0,17	1,79	0,33	1,20	2,60	
K06	150				0,15	0,13	0,82	0,13	0,33	0,26	2,06	0,26	0,82	2,50	
K06	210				0,13	0,07	0,90	0,07	0,26	0,13	2,18	0,13	0,62	2,44	
K06	330				0,13	0,15	1,05	0,08	0,19	0,26	2,44	0,13	0,44	2,33	
K06	450				0,11	0,07	1,12	0,04	0,15	0,08	2,53	0,04	0,34	2,26	

